

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Stanovení vlivu mechanických hodnot na velikost odpružení při ohýbání hlubokotažných plechů

Identification the influence of mechanical values on suspension size at bending of deep-drawing sheet

Jiří Trdla
KSP – TP – 783

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - *TU v Liberci*
Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Doubek - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	107
Počet tabulek	32
Počet příloh	2
Počet obrázků	83

Datum: 25.5.2007



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Jiří T R D L A
Studijní program	M 2301 Strojní inženýrství
Obor	2303T002 Strojírenská technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Stanovení vlivu mechanických hodnot na velikost odpružení při ohýbání hlubokotažných plechů

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se s problematikou ohýbání plechů.
2. Parametry ovlivňující velikost odpružení.
3. Experimentální zjištění vlivu mechanických hodnot a velikosti kalibrační síly na velikost odpružení při ohýbání hlubokotažných materiálů.
4. Na základě provedených experimentálních měření stanovit závislost mechanických hodnot a velikosti kalibrační síly testovaných materiálů na velikost odpružení.
5. Závěr.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva: cca 50 stran
- grafické práce: tabulky, grafy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] PEARCE, P.: Sheet Metal Forming, ISBN 0-7503-0101-5.
- [2] BOLJANOVIC, V.: Sheet Metal Forming Processes and Die Design, New York, 2004, ISBN 0-8311-3182-9.
- [3] MACHEK, V. - VESELÝ, L. - VESELÝ, M. - VIŠŇÁK, J.: Zpracování tenkých plechů, SNTL, Praha 1983.
- [4] MRÁZ, P.: Tvarová a rozměrová přesnost výlisků při ohýbání plechů, [Diplomová práce], VŠST, Liberec, 1996.
- [5] MARCINIAK, Z. a kol.: Teorie tváření plechů, SNTL, Praha, 1964.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.



doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry

prof. Ing. Petr Louda, CSc.
děkan

V Liberci dne 15. 2. 2007

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedeném lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství
Diplomant: Jiří Trdla
Téma práce: Stanovení vlivu mechanických hodnot na velikost odpružení při ohýbání hlubokotažných plechů
Identification the influence of mechanical values on suspension size at bending of deep-drawing sheet
Číslo DP: KSP – TP – 783
Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*
Konzultant DP: Ing. Pavel Doubek – *TU v Liberci*

Abstrakt:

Tématem diplomové práce je stanovení vlivu mechanických hodnot na velikost odpružení při ohýbání hlubokotažných plechů. Pro zjištění mechanických vlastností materiálů byla použita statická zkouška tahem. Pro zjištění velikosti odpružení a dráhy nástroje byla použita zkouška ohybem. Vyhodnocením naměřených hodnot byly stanoveny závislosti, které mohou být pomocí při návržení vhodné kalibrační síly za účelem eliminace odpružení v případě ohýbání hlubokotažných plechů.

Abstract:

The diploma thesis deals with identification the influence of mechanical values on suspension size at bending of deep-drawing sheet. For findings of mechanical values of materials was used the static tensile test. For finding a suspension size and a tool uplift size a bending test was used. The results of measured data were used for determination of some dependencies that can be useful for suggestion of suitable calibration force towards elimination of suspension at bending of deep-drawing sheet.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vykonal samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne 25. května 2007

.....

Jiří Trdla

Rabasova 12

466 04 Jablonec nad Nisou

Poděkování:

V úvodu bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za jeho vysoce odborné vedení, rady a věcné připomínky, díky kterým jsem se mohl mnohem lépe orientovat v celé problematice při vypracování diplomové práce. Dále chci touto cestou poděkovat Ing. Jiřímu Karáskovi za propůjčení přístroje na měření úhlů.

Zvláště pak chci poděkovat své rodině za maximální podporu po celé období mého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1	Teorie ohýbání	10
2.1.1	Druhy ohýbání	11
2.1.2	Neutrální osa	14
2.1.3	Rozvinutá délka polotovaru	16
2.1.4	Napětí při ohýbání.....	17
2.1.5	Mezní stavy při ohýbání.....	19
2.1.5.1	Maximální poloměr ohybu.....	20
2.1.5.2	Minimální poloměr ohybu	20
2.1.6	Ohýbací síla	21
2.1.6.1	Výpočet ohýbací síly při ohybu do tvaru „V“.....	21
2.1.6.2	Výpočet ohýbací síly při ohybu do tvaru „U“.....	23
2.1.7	Ohýbací práce	24
2.1.7.1	Výpočet ohýbací práce při ohybu do tvaru „V“.....	25
2.1.7.2	Výpočet ohýbací práce při ohybu do tvaru „U“.....	25
2.1.8	Odpružení.....	25
2.1.8.1	Vlivy působící na odpružení	27
2.1.8.2	Způsoby zamezení odpružení.....	29
2.1.8.3	Výpočtové vztahy pro odpružení	37
2.1.8.4	Technologický rozbor ohybu	40
2.1.8.5	Analýza odpružení materiálu při kalibrování.....	43
2.1.9	Technologické problémy ohýbání.....	48
2.2	Materiály určené k tváření	51
2.2.1	Oceli s BH efektem.....	52
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	54
3.1	Příprava vzorků.....	54
3.2	Statická zkouška tahem.....	55
3.2.1	Měření a vyhodnocení statické zkoušky tahem	57
3.2.2	Výsledky statické zkoušky tahem.....	58
3.3	Koeficient normálové anizotropie.....	69
3.3.1	Příprava vzorků.....	69
3.3.2	Určení koeficientů normálové anizotropie.....	70
3.4	Zkouška ohybem.....	71
3.4.1	Ohýbací nástroj	71
3.4.2	Měření ohybu	72
3.4.3	Statické zpracování naměřených hodnot	75
3.4.4	Grafické znázornění výsledků	76
3.4.5	Rozbor získaných výsledků	94
4	ZÁVĚR	102
5	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	105

Seznam použitých symbolů

<u>Označení</u>	<u>Název</u>	<u>Jednotka</u>
A_{80}	Tažnost	[%]
A_g	Homogenní tahnost na mezi pevnosti	[%]
b	Šířka materiálu	[mm]
c	Koeficient monotónního zpevnění	[MPa]
C	Celiho součinitel	[1]
$DÚ$	Dolní úvrať lisu	[mm]
E	Yongův modul pružnosti	[MPa]
f	Koeficient tření	[1]
F_o	Ohýbací síla	[N]
h	Zdvih nástroje	[mm]
J	Moment setrvačnosti	[mm ⁴]
L	Vzdálenost podpor při ohybu do „V“	[mm]
L_p	Rozvinutá délka polotovaru	[mm]
M_o	Ohybový moment	[Nm]
n	Exponent deformačního zpevnění	[1]
r	Poloměr ohybu	[mm]
r	Koeficient normálové anizotropie	[1]
r_1	Vnitřní poloměr ohybu	[mm]
r_2	Vnější poloměr ohybu	[mm]
r_m	Technologický poloměr – poloměr zaoblení ohybnice	[mm]
r_{max}	Maximální poloměr ohybu	[mm]
r_{min}	Minimální poloměr ohybu	[mm]
r_p	Konstrukční poloměr – poloměr zaoblení ohybníku	[mm]
R_e	Výrazná mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S_o	Počáteční plocha příčného průřezu vzorku	[mm ²]
t	Tloušťka materiálu	[mm]
T	Teplota	[°C]
W_o	Průřezový modul v ohybu	[mm ³]
α	Úhel ohybu	[°]
$\hat{\alpha}$	Úhel ohybu v obloukové míře	[rad]

[illegible]

1 ÚVOD

Oblast tváření je jednou z významných technologií, která je díky svému širokému uplatnění nepostradatelnou součástí strojírenského průmyslu. Tvářením získávají polotovary nejen svůj tvar, ale i očekávané vlastnosti. Tvářecí proces je vyvolán působením vnějších sil na výchozí materiál, které způsobí plastické přetvoření a trvalou deformaci materiálu.

Vzhledem k novým možnostem využití moderních materiálů je tváření obor s velmi dynamickým vývojem. S technickým rozvojem se uplatňují stále novější technologie, jejichž vývoj se přizpůsobuje ekonomickým požadavkům výroby, které vyžadují co nejracionalnější dosažení požadovaného tvaru a vlastností tvářeného výlisku.

Jednou z oblastí tváření, která se vyznačuje tím, že se dosahuje požadované změny tvaru součásti bez podstatné změny průřezu, je tváření plošné. Ve strojírenství se s ním lze setkat ve velkém rozsahu, zejména však ve stále se rozvíjejícím automobilovém průmyslu. Vedle stříhání, jenž má v oblasti plošného tváření dominantní postavení, musí materiál získat potřebný tvar s určitou geometrickou přesností vyhovující pozdější montáži, a to bez výrazných změn mechanických vlastností, k tomu je určeno ohýbání.

Při ohýbání dochází k plastické deformaci jejímž průvodním jevem je odpružení materiálu. Jako průvodní jev je při ohýbání realizováno vždy a nelze se ho nikdy úplně zbavit, je možné jej pouze vhodnými konstrukčními řešeními či úpravou technologických parametrů určitým způsobem eliminovat. Pro odpružení má význam pouze deformovaná část objemu, závisí tedy přímo na poloměru ohybu, dále na rozměrech a mechanických vlastnostech ohýbaného výlisku, a na mnoha dalších faktorech. To je důvodem mnoha teoretických a experimentálních studií věnující se této problematice. Jednou z metod, která má přímý vliv na odpružení, dokáže jej velmi úspěšně eliminovat, je kalibrace materiálu.

Cílem této diplomové práce bylo stanovení vlivu mechanických vlastností a kalibrační síly na velikost odpružení při ohýbání. Dalším úkolem bylo posoudit vlivy dalších činitelů pro závislost kalibrační síly na odpružení, kterými byli poloměr ohybu, tloušťka materiálu a další.

Zkoušenými materiály byly hlubokotažné plechy rozdílných mechanických vlastností, jedná se o materiály stále velmi žádané v oboru tváření vzhledem k jejich velmi dobré tažnosti. Zjištěné závislosti mohou být pomoci při návrhu vhodné kalibrační síly v případě ohýbání hlubokotažných plechů s podobnými parametry.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Teorie ohýbání

Ohýbání je tvářecí operace, při které vzniká přetvoření materiálu ohybem, který je vyvolaný momentem vnějších sil. Patří do oblasti plošného tváření, které se vyznačuje tím, že se dosahuje požadované změny tvaru součásti bez podstatné změny průřezu.

K ohýbání jsou používány nástroje – ohýbadla, jejichž hlavními částmi jsou ohybník a ohybnice. Výrobek se nazývá výlisek, ohybek. Ohnutí tělesa do žádoucího tvaru využívá stejných zákonů plasticity jako ostatní způsoby tváření – v místech, kde je překročena mez kluzu dochází k plastické deformaci. Ta je doprovázena deformací elastickou, jedná se tedy o deformaci pružně plastickou.

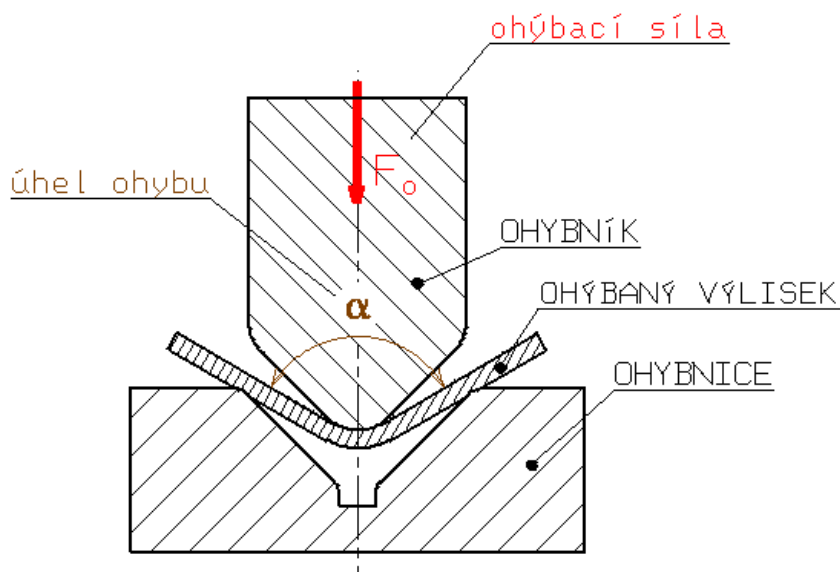
Charakteristickým znakem ohýbání je změna tvaru osy ohýbané součásti. Když má ohýbání dát výchozímu plochému materiálu požadované zakřivení, jedná se o ohýbání. V opačném případě, když je účelem získat z ohnutého výchozího materiálu součást s rovnou osou, jde o rovnání. V případě ohýbání se zpravidla zmenšuje poloměr zakřivení až na hranici mezní hodnoty přetvoření za studena r_{\min} , u rovnání se naopak poloměr zakřivení zvětšuje.

Z hlediska působení na výchozí materiál je možné rozlišení na ohyb vnějšími momenty, ohyb lokálními silami a ohyb s kombinací vnějších zatížení, např. ohýbání a tažení, ohýbání a stlačování apod.

Při ohýbání jsou vrstvy kovu na vnější straně ohybu v podélném směru roztahovány a prodlužovány, na vnitřní straně stlačovány a zkracovány. V příčném směru se vrstvy na vnější straně stlačují a na vnitřní roztahují. Mezi zkracovanými a prodlužovanými vrstvami je neutrální osa, v ní je nulové napětí. Dále se zde nachází vrstva nulové deformace, která se při ohýbání neprodlouží ani nezkrátí. V jejím okolí je pásmo pružných deformací, které je příčinou odpružení. Geometrický střed ohýbaného materiálu tvoří střední vrstva, která je pro většinu těles shodná s osou těžiště ohýbaného materiálu. Neutrální osa s ní není totožná, při ohybu se posouvá směrem k vnitřní straně. Její délka odpovídá rozvinutému tvaru polotovaru.

Přehled názvosloví a základních technologických operací při ohýbání je uveden v ČSN 22 6001. Všeobecné údaje o ohýbání, včetně směrnic pro výpočty a konstrukci ohýbadel, jsou uvedeny v ČSN 22 7340.

Příklad volného ohybu se základními parametry ohýbání je na obr. 2.1.1.



Obr. 2.1.1: Volný ohyb osamělou silou

2.1.1 Druhy ohýbání [1]

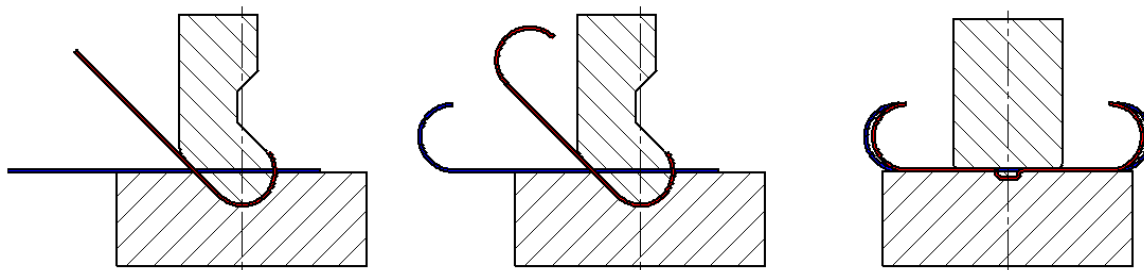
Ohýbání je podle ČSN 22 6001 rozdělené na následující operace:

- ohýbání, ohraňování, rovnání, zakružování, lemování, obrubování, osazování, drápkování a zkrucování.

Podle technologického způsobu výroby se dělí do následujících skupin:

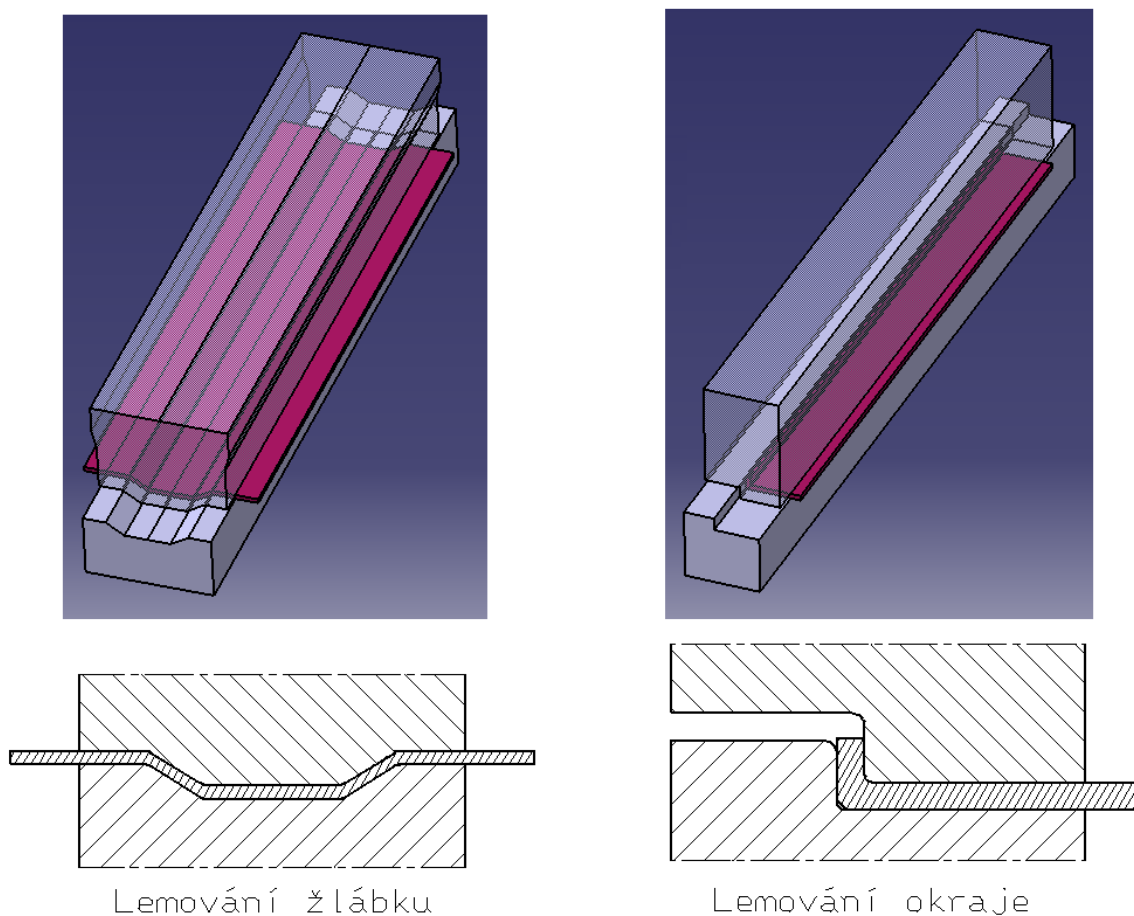
- ohýbání – směr pohybu pohyblivé čelisti se přibližně shoduje se směrem osy úhlu tvořeného rameny ohnutého předmětu
 - podle použitého polotovaru se dělí na dva způsoby:
 - *Prosté ohýbání při plošném tváření* je přetváření plochého materiálu ve výlisek s rovinnými a různě vzájemně orientovanými plochami ohýbadlem, vytvořené hrany mohou být ostré nebo oblé
 - *Prosté ohýbání při objemovém tváření* je přetváření přímého tyčového nebo profilového materiálu a polotovarů v úhlové, popř. obloukové výtvarky ohýbadlem
- ohraňování – slouží k výrobě profilů různých tlouštěk, kdy lze docílit i malého poloměru zaoblení. Princip se neliší od ohýbání v nástroji na běžném lisu, avšak rozdíl je v délce nástroje i lisu. Výchozím materiálem jsou pásy plechu, jejichž délka je omezena šířkou ohraňovacího lisu. Každá tvářecí operace se provede na jeden zdvih lisu a pro každý tvar profilu se musí na lis upevnit

samostatné nástroje. Nástroj je tvořen z různých ocelových lišt, které se ke stroji dodávají nebo se speciálně konstruuje a vyrábějí. Postup při ohýbání profilu na ohraňovacím lise je znázorněn na obr. 2.1.1.1.



Obr. 2.1.1.1: Ohýbání profilu na ohraňovacím lise [1]

- lemování – používá se v případě, kdy je potřeba vyztužit okraj výlisku nebo připravit polotovar na dodatečné vytvoření spoje. Slouží také k výrobě žlábků uprostřed nebo na okraji pro zvýšení tuhosti výlisku. Provádí se lemovadlem, princip je znázorněn na obr. 2.1.1.2.



Obr. 2.1.1.2: Princip technologie lemování

- zakružování – je přetváření materiálu s rovinnými nebo členitými plochami pomocí válců. Provádí se na jednoúčelových nebo speciálních strojích většinou na jednu operaci a dá se vytvořit zavřený nebo téměř uzavřený profil
- drápkování – je pevné spojování předehtnutých okrajů plechů po jejich vzájemném zaklesnutí a společném doohnutí drápkovadlem. Dosáhne se tím pevného spojení ohnutých okrajů, jenž byly vytvořeny lemováním. Drápkuje se většinou na jednoúčelových strojích speciální konstrukce.
- zkrcování – je pootáčení plochého nebo profilového materiálu, polotovaru, popř. i výkovku proti sousední části kolem společné osy o určitý úhel zkrcovadlem
- navíjení – je proces, kdy se tvářený materiál navíjí postupně na válec a dostává požadovaný tvar shodný s tvarem nástroje. Nejčastěji se navíjení používá při stáčení plechů do svitku

Podle tvaru ohybu se dělí na:

- ohýbání do tvaru „V“
- ohýbání do tvaru „U“

Podle poloměru zakřivení se dělí na:

- ohyb s malým poloměrem za vzniku velké plastické deformace
- ohyb s velkým poloměrem zakřivení při poměrně malém stupni plastické deformace

V lisovacích nástrojích je možno ohýbat součásti dvěma způsoby:

- bez přidržovače – používá se u výrobků, u kterých není potřeba velkých přesností, protože se nevylučuje sesunutí materiálu během ohýbání
- s přidržovačem – používá se pro materiály s požadavkem větší přesnosti

Podle způsobu pohybu nástroje vzhledem k tvářenému materiálu lze ohýbat dvěma způsoby:

- ohýbání na lisech - materiál se tváří v nástroji, ohýbadle, jehož pohyblivá čelist vykonává přímočaré vratné pohyby. V průmyslové výrobě se dělá na mechanických a hydraulických lisech, resp. na speciálních ohýbacích strojích – ohýbačkách. Při tomto ohýbání může být nástrojem i ohraňovadlo,

lemovadlo nebo drápkovadlo, záleží na druhu technologické operace

- ohýbání na válcích - nástrojem jsou samotné válce, které vykonávají otáčivý pohyb

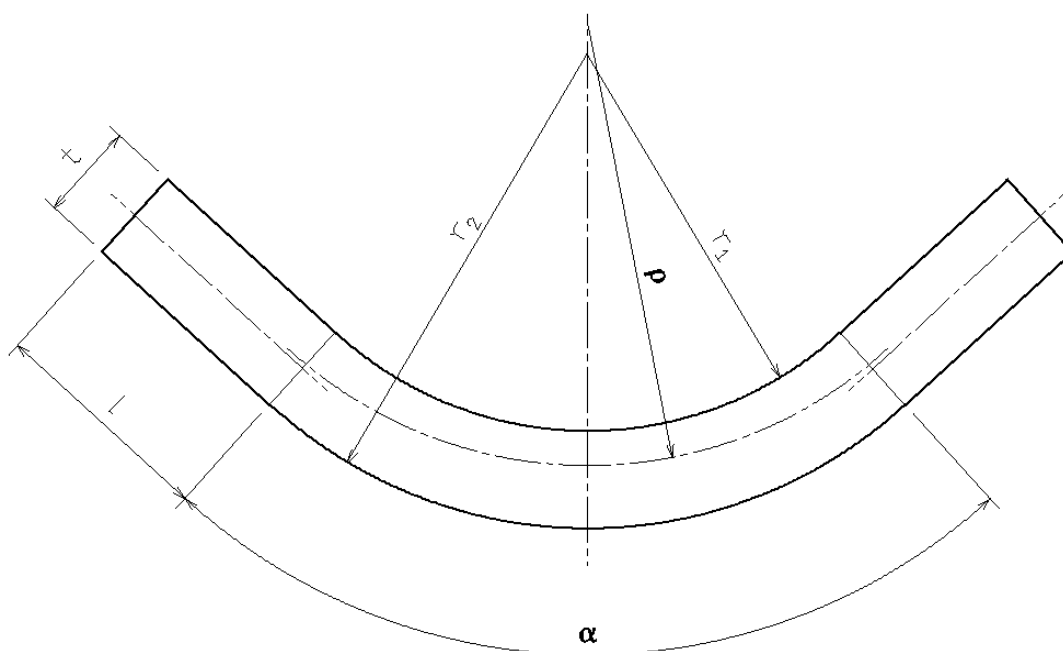
2.1.2 Neutrální osa

V místě ohybu vykazuje ohýbaný materiál tři pásma:

- pásmo pružných deformací kolem neutrální osy
- vnější pásmo trvalého prodloužení
- vnitřní pásmo trvalého napěchování

Nyní bude pozornost zaměřena na oblast pružných deformací v blízkosti neutrální osy.

V okolí střední části průřezu ohýbaného materiálu jsou napětí malá a dosahují hodnot nižších, než je mez kluzu materiálu. Na vnější straně se vyskytují tahová napětí, na vnitřní tlaková, a v přechodu mezi nimi jsou vlákna bez napětí a deformace. Jejich spojnice tvoří tzv. neutrální osu, ve které není napětí a která se při ohýbání ani neprodlouží ani nezkrátí. V okolí neutrální osy je pásmo pružných deformací, které je příčinou odpružování po odlehčení. Neutrální osa není totožná s osou těžiště ohýbaného materiálu. Na začátku ohýbání je uprostřed průřezu, při ohybu se posouvá směrem k vnitřní straně ohybu (obr. 2.1.2.1.).



Obr. 2.1.2.1: Posunutí neutrální osy v místě ohybu

Neutrální osa má tvar paraboly, je však nahrazována kruhovým obloukem. Její poloha závisí na poloměru ohybu r , tloušťce materiálu t , tyto dva faktory jsou posuzovány společně jako relativní poloměr ohybu r/t . Dále závisí také na ztenčení a rozšíření průřezu. Základní vzorec pro určení polohy neutrální osy:

$$\rho = r + xt \quad (2.1.2.1.)$$

kde x je součinitel závislý na relativním poloměru ohybu r/t (tab. 2.1.2.1.).

Tab. 2.1.2.1: Posunutí neutrální osy [2]

r/t [-]	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0	20,0
x [-]	0,32	0,35	0,38	0,42	0,45	0,464	0,475	0,479	0,48	0,5

Jiné vzorce pro výpočet polohy neutrální osy zohledňují vliv ztenčení tloušťky materiálu [3]:

$$\rho = \frac{r_2 + r_1}{2} x_s x_b \quad (2.1.2.2.)$$

kde $x_s = t_1/t$ součinitel ztenčení [-]

$x_b = b_1/b$ součinitel rozšíření [-]

Hodnoty součinitelů ztenčení a rozšíření jsou uvedeny v tab. 2.1.2.2., resp. v tab. 2.1.2.3.

Tab. 2.1.2.2: Součinitel x_s [3]

r/t [-]	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0
x [-]	0,82	0,87	0,92	0,96	0,985	0,992	0,995	0,997	0,998

Tab. 2.1.2.3: Součinitel x_b [3]

b/t [-]	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
x_b [-]	1,09	1,07	1,05	1,025	1,01	1,005	1,000

V případě ohybu širokých materiálů, kde šířka je několikrát větší než tloušťka, probíhá ohyb bez znatelné příčné deformace a je možné uvažovat $x_b = 1$.

2.1.3 Rozvinutá délka polotovaru

Z délky neutrální osy v ohýbaných částech a z délek rovných úseků se určuje rozvinutá délka polotovaru před ohybem. Požadovaný tvar se rozdělí na přímé a obloukové úseky a celková délka je dána součtem jednotlivých délek rovných a ohýbaných úseků. Při výpočtu se uvažuje délka neutrální osy. U tenkých plechů není rozdíl od délky osy těžiště patrný, ale při ohýbání tlustých plechů se s ním musí počítat.

Pro různé délky oblouku se počítá délka neutrální osy:

$$l_i = \widehat{\alpha} \cdot \rho \quad (2.1.3.1.)$$

přičemž pomocí (2.1.3.1.) lze vzorec upravit na tvar:

$$l_i = \frac{\pi \alpha}{180} (r + x \cdot t) \quad (2.1.3.2.)$$

kde x je součinitel závislý na relativním poloměru ohybu (tab. 2.1.2.1.).

Pokud jsou známy délky neutrální osy v místech ohybu, je možné připočtením délek rovných úseků získat vzorec pro výpočet rozvinuté délky polotovaru:

$$L_p = \sum_{i=0}^m l_i + \sum_{j=0}^n l_j \quad (2.1.3.3.)$$

kde je:

l_i délka neutrální osy v místě ohybu [mm]

l_j délka neutrální osy rovného úseku [mm]

Tato tematika je však také závislá na tom, jsou-li při ohybu přítomny osově síly či nikoli. Při prostém ohybu bez osových sil, kdy

$$\rho^2 = r_1 \cdot r_2 \quad (2.1.3.4.)$$

nedochází ke změně tloušťky. Naopak při ohybu s osovým tažením, kdy

$$\rho^2 < r_1 \cdot r_2 \quad (2.1.3.5.)$$

což je většina praktických postupů, nastává ztenčení, a při ohybu se stlačováním, kdy

$$\rho^2 > r_1 \cdot r_2 \quad (2.1.3.6.)$$

se tloušťka pásu zvětšuje.

Plocha výchozího průřezu je rovna ploše mezikruhové výseče

$$l_o \cdot t_o = \pi(r_2^2 - r_1^2) \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{\alpha}{2} (r_2^2 - r_1^2) \quad (2.1.3.7.)$$

kde je:

t_o tloušťka výchozího materiálu [mm]

l_o délka ohýbaného úseku výchozího materiálu [mm]

Z rovnic (2.1.3.1.) a (2.1.3.7.) plyne

$$\rho = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot t_o} \quad (2.1.3.8.)$$

a s pomocí vzorců pro výpočet tloušťky a poloměru osy těžiště ohýbaného materiálu

$$t = r_2 - r_1 \quad (2.1.3.9.)$$

$$\rho_t = \frac{1}{2}(r_1 + r_2) \quad (2.1.3.10.)$$

získáme vztah mezi neutrální osou a osou těžiště ohýbaného materiálu [4]:

$$\rho = \rho_t \frac{t}{t_o} \quad (2.1.3.11.)$$

Ze vzorce (2.1.3.11.) vyplývá, že poloha neutrální osy je závislá na změně tloušťky ohýbaného pásu. Je-li známa její poloha, lze určit hodnotu podélného logaritmického přetvoření pro libovolnou vrstvu ohnutého pásu [4]:

$$\varphi_1 = \ln \frac{1}{1_o} = \ln \frac{\rho_o}{\rho_t \alpha} = \ln \frac{\rho}{\rho_t} \quad (2.1.3.12.)$$

Při ohýbání bez osových sil je poloha neutrální osy shodná s polohou osy těžiště, nedochází ke změně tloušťky t_o a neutrální osa leží uprostřed tloušťky pásu.

2.1.4. Napětí při ohýbání

V této části bude analyzován ohyb materiálu z hlediska působení napětí v ohýbaném tělese. Bude se předpokládat, že se jedná o tuhoplastický materiál, kde budou ohýbány široké pásy malými poloměry ohybu (obr. 2.1.4.1.). Za těchto předpokladů platí následující podmínky:

$$\sigma_k = \text{konst.} \quad (2.1.4.1.)$$

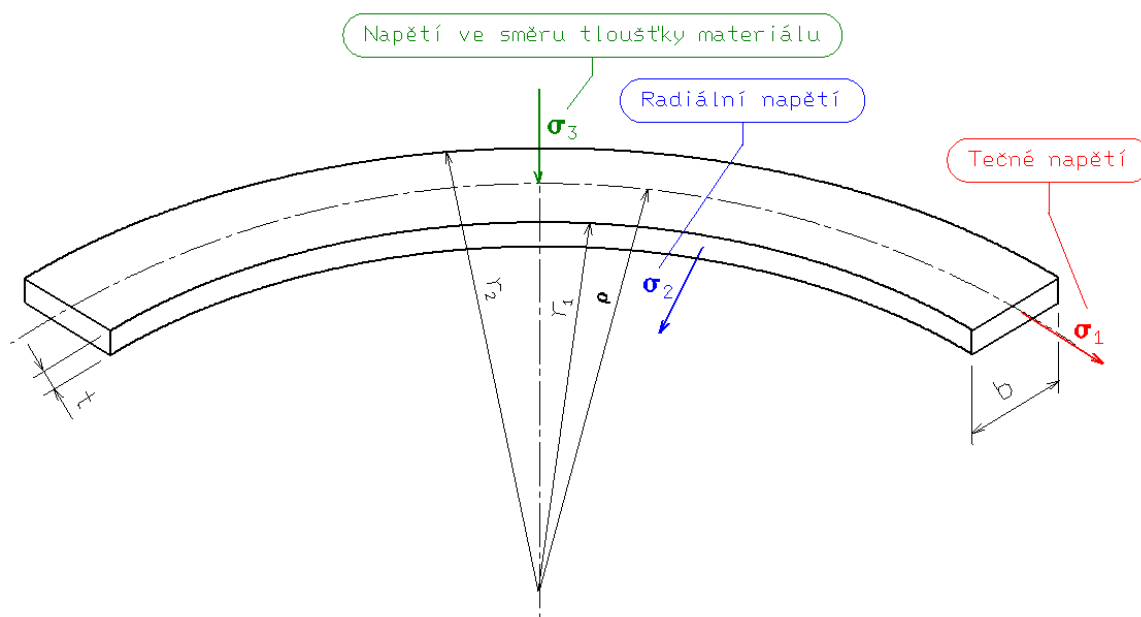
$$r/t < 12 \quad (2.1.4.2.)$$

$$b > 3 \cdot t_o \quad (2.1.4.3.)$$

Z podmínky (2.1.4.3.) pro ohyb širokých pásů, kde t_o je původní tloušťka materiálu, vyplývá deformační podmínka tvaru:

$$\varphi_2 = 0 \quad (2.1.4.4.)$$

udává, že nedochází k deformaci v tomto směru.



Obr. 2.1.4.1: Základní schéma ohybu

V těchto případech jsou pro napětí ve směru tloušťky materiálu odvozovány teoretické vztahy a jejich výsledkem jsou následující rovnice:

- v oblasti tahu, kde $r > \rho$, platí vztah:

$$\sigma_3 = \sigma_k \ln \frac{r_1}{r} \quad (2.1.4.5.)$$

- v oblasti tlaku, kde $r < \rho$, platí vztah:

$$\sigma_3 = \sigma_k \ln \frac{r}{r_2} \quad (2.1.4.6.)$$

V obou případech po dosazení jakéhokoli poloměru r vychází vždy záporná hodnota. Z toho vyplývá, že ve směru tloušťky materiálu je vždy tlak a tím dochází k zmenšení tloušťky materiálu.

S použitím Trescovy podmínky plasticity ve tvaru:

$$\sigma_k = |\sigma_1 - \sigma_3| \quad (2.1.4.7.)$$

budou pro velikost tečného napětí platit následující rovnice:

- v oblasti tahu, kde $r > \rho$, platí vztah:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_k \quad (2.1.4.8.)$$

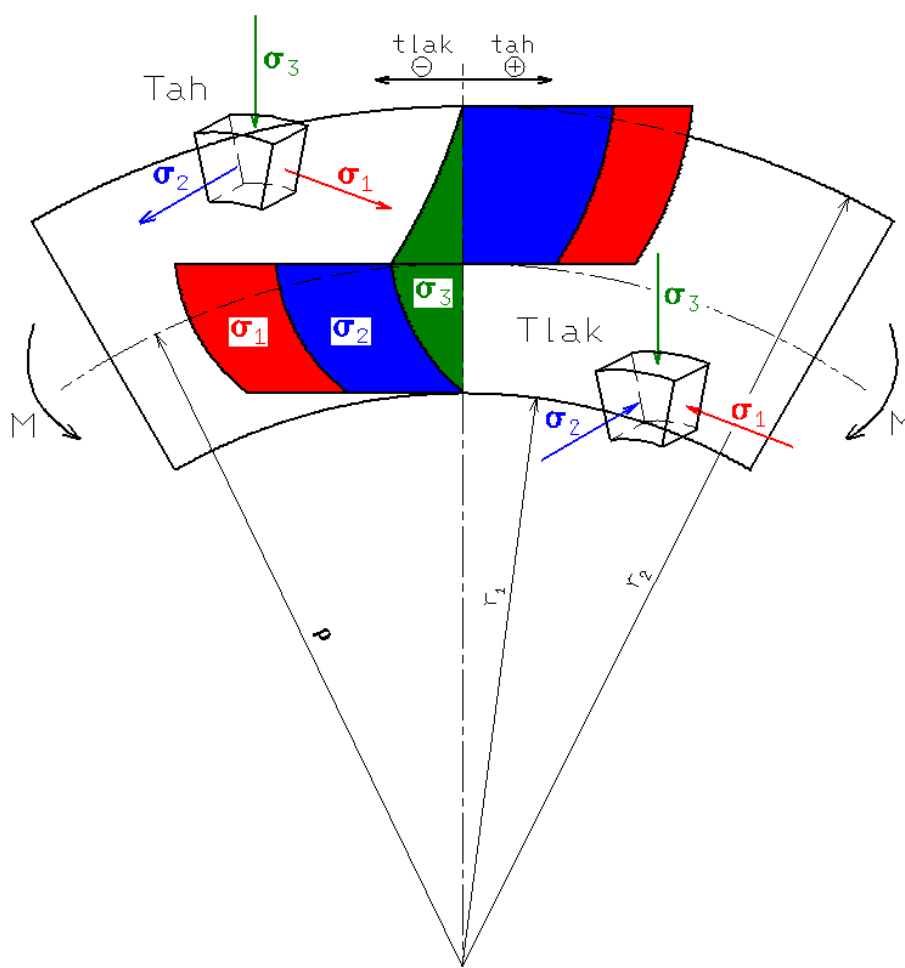
- v oblasti tlaku, kde $r < \rho$, platí vztah:

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_k \quad (2.1.4.9.)$$

Pro radiální napětí platí vztah:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (2.1.4.10.)$$

Průběhy všech tří napětí jsou na obr. 2.1.4.2.



Obr. 2.1.4.2: Průběhy napětí při ohýbání [4]

2.1.5 Mezní stavy při ohýbání

Při návrhu ohýbaných dílů je nutné respektovat požadavky na přípustné hodnoty poloměrů ohybu. Poloměr ohybu musí být alespoň takový, aby se v krajních vláknech vůbec překročila hodnota meze kluzu, jinak by nedošlo k plastické deformaci. Směrodatná je tedy v tomto případě hodnota maximálního poloměru ohybu r_{\max} .

Poloměr nesmí však být ani příliš malý, určuje se tedy minimální poloměr ohybu r_{\min} a tato hodnota má při ohýbání zásadní význam. Jeho správně zvolená velikost zaručí, že na vnější tahové straně výlisku nevzniknou trhlinky. K tomu dochází v případě, kdy tečné tahové napětí v krajních vláknech dosáhne meze pevnosti v tahu.

Poloměr ohybu se má volit z hlediska odpružení co nejmenší, ale vzhledem k tvárnosti a tloušťce ohýbaného materiálu co největší. Jinak by došlo k destrukci v ohýbaném průřezu.

2.1.5.1 Maximální poloměr ohybu

Maximální poloměr ohybu je poloměr, při němž v krajních vláknech dojde k trvalému, nevratnému přetvoření. Rozepsáním rovnice pro výpočet poměrného přetvoření v krajních vláknech získáme vztah [4]:

$$\varepsilon_1 = \frac{l_2 - l_0}{l_0} = \frac{r_2 \cdot \alpha - \rho \cdot \alpha}{\rho \cdot \alpha} = \frac{(r_1 + t) \alpha - (r_1 + \frac{t}{2}) \alpha}{(r_1 + \frac{t}{2}) \alpha} = \frac{t}{2 r_1 + t} \quad (2.1.5.1.1.)$$

kde je:

l_0 délka oblouku neutrální vrstvy [mm]

l_2 délka oblouku vnějšího poloměru ohybu [mm]

Dosazením (2.1.5.1.1.) do rovnice Hookova zákona dostaneme rovnici:

$$\varepsilon_{1\min} = \frac{\sigma_k}{E} = \frac{t}{2 r_{1\max} + t} \quad (2.1.5.1.2.)$$

ze které je získán vztah pro maximální poloměr ohybu vnitřní stěny:

$$r_{1\max} = \frac{t}{2} \left(\frac{E}{\sigma_k} - 1 \right) \quad (2.1.5.1.3.)$$

2.1.5.2. Minimální poloměr ohybu

Nejmenší přípustný poloměr ohybu, kdy v krajních vláknech nedochází ke vzniku trhlinek, závisí na:

- tloušťce materiálu
- druhu materiálu
- tepelném zpracování
- stupni tváření
- směru válcování materiálu

Často se určuje také na základě praktických měření. Pro odvození teoretického vztahu se vychází z rovnice (2.1.5.1.1.) pro poměrné přetvoření v krajních vláknech, z níž pro maximální poměrné přetvoření platí:

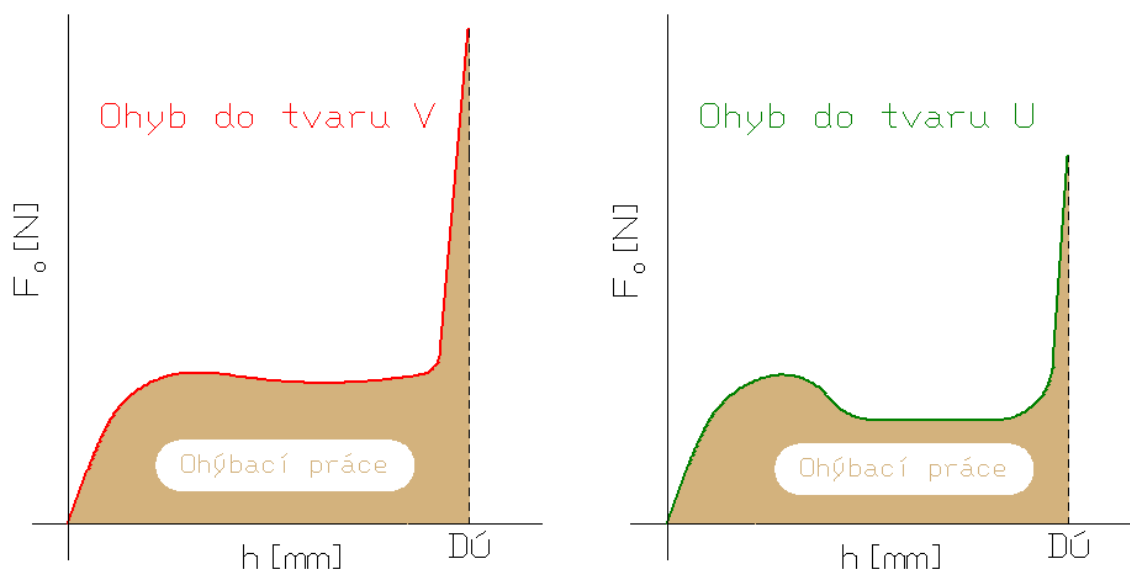
$$\varepsilon_{1\max} = \frac{t}{2 r_{1\min} + t} \quad (2.1.5.2.1.)$$

Úpravou (2.1.5.2.1.) je možno získat minimální poloměr ohybu:

$$r_{1\min} = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{1\max}} - 1 \right) \quad (2.1.5.2.2.)$$

2.1.6 Ohýbací síla

Ohyb do „V“ se od ohybu do „U“ liší nejen velikostí ohýbací síly potřebné k úplnému ohnutí polotovaru, rozdílné jsou i průběhy ohybových sil na zdvihu ohybníku. Jejich grafický průběh je znázorněn na obr. 2.1.6.1.



Obr. 2.1.6.1: Průběhy ohýbací síly [5]

Podle normy ČSN 22 7340 se při výpočtu ohýbací síly při ohýbání postupuje následujícím způsobem.

2.1.6.1 Výpočet ohýbací síly při ohybu do tvaru „V“

Ohýbaný polotovar se považuje za nosník, spočívající na dvou podporách ve vzdálenosti L zatížený ohýbací silou F_o uprostřed. Ohýbací síla se odvozuje ze vzorce pro výpočet ohybového momentu jehož rozepsáním je získán vztah závislosti ohybového momentu na rozměrových a materiálových charakteristikách ohýbaného materiálu:

$$M = \sigma_o \cdot W_o = \frac{F_o \cdot L}{4} = W_o \cdot R_m (1,3 + 0,8\varepsilon) = (1,3 + 0,8\varepsilon) \frac{b \cdot t^2}{6} R_m \quad (2.1.6.1.1)$$

z něhož je vyjádřením získán vztah pro ohýbací sílu [1]:

$$F_o = \frac{4(1,3 + 0,8\varepsilon) \cdot b \cdot t^2 \cdot R_m}{6} \quad (2.1.6.1.2.)$$

Ohýbací sílu je třeba dále zvětšit o celkové tření pracovních částí ohýbadla a ohýbané součástky, které prakticky dosahují až 1/3 její hodnoty.

Při kalibraci materiálu se k ohýbací síle připočte ještě kalibrační síla, pro kterou platí vztah [1]:

$$F_k = S \cdot q \quad (2.1.6.1.3.)$$

kde je:

S plocha kalibrovaného materiálu [mm²]

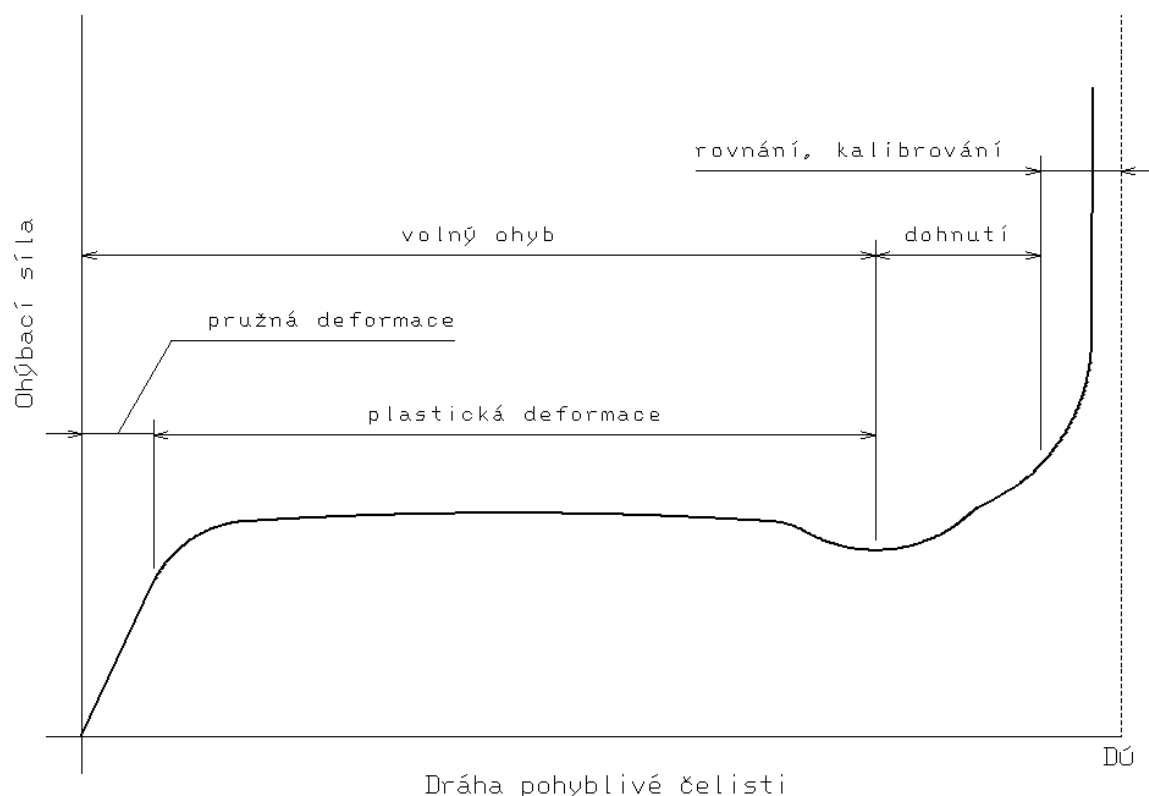
q specifický tlak na vyrovnání [MPa]

Celková ohýbací síla s přihlédnutím ke tření pracovních částí ohýbadla a ohýbané součástky při současné kalibraci bude mít velikost:

$$F_c = 1,3 \cdot F_o + F_k \quad (2.1.6.1.4.)$$

Průběh ohýbací síly v závislosti na pohybu ohybníku je na obr. 2.1.6.1.1., patrné je výrazné zvýšení ohýbací síly ve fázi kalibrování.

Podobně se postupuje podle ČSN 22 7340 i při výpočtu jiných způsobů ohýbání součástek v ohýbadlech. Podrobnosti jsou uvedené v normě.



Obr. 2.1.6.1.1: Průběh ohýbací síly v závislosti na pohybu ohybníku [1]

Při předpokladu zjednodušeného rozložení napětí v průřezu bude vzorec pro ohybový moment [5]:

$$M_o = \frac{F_o \cdot L}{4} \quad (2.1.6.1.5.)$$

jiným způsobem lze vyjádřit ohybový moment také vzorcem:

$$M_o = W_o \cdot \sigma_o = \frac{bt^2}{4} \sigma_o \quad (2.1.6.1.6.)$$

Dosazením (2.1.6.1.5.) do (2.1.6.1.6.) je získána rovnost:

$$\frac{F_o L}{4} = \frac{bt^2}{4} \sigma_o \quad (2.1.6.1.7.)$$

ze které je vyjádřením získán vztah pro ohýbací sílu [5]:

$$F_o = \frac{bt^2}{L} \sigma_o \quad (2.1.6.1.8.)$$

z mezní podmínky vyplývá, že $\sigma_o \leq R_m$.

Protože nejde o čistě jednoosou napjatost, a také při ohybu v nástroji dochází k tření mezi ohýbaným materiálem a nástrojem – je toto napětí zvyšováno Celiho součinitelem C nazývaného rovněž součinitelem zpevnění, takže pro ohyb do tvaru „V“ bude:

$$F_o = \frac{bt^2}{L} R_m \cdot C \quad (2.1.6.1.9.)$$

Pro Celiho součinitel platí vztah:

$$C = 1 + \frac{4t}{1} \quad (2.1.6.1.10.)$$

a jeho přibližné hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.1.6.1.1.

Tab. 2.1.6.1.1: Hodnoty Celiho součinitele [5]

	Ohyb do tvaru V	Ohyb do tvaru U
C [-]	1,15 – 1,45	1,6 – 1,8

V literatuře [2], [6] jsou uvedeny i jiné způsoby výpočtu ohýbací síly:

$$F_o = \frac{2 \cdot b \cdot t^2 \cdot R_m}{3 \cdot L} \quad (2.1.6.1.11.)$$

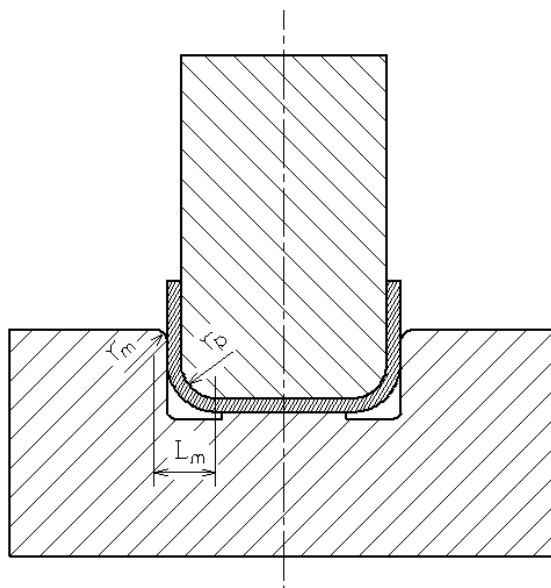
$$F_o = \frac{b \cdot t \cdot R_m}{2 \cdot \rho} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (2.1.6.1.12.)$$

2.1.6.2 Výpočet ohýbací síly při ohybu do tvaru „U“ [5]

Pro ohyb do tvaru „U“ je ohýbání realizováno současně ve dvou průřezích. Při zjišťování velikosti ohýbací síly se opět vychází ze vztahu pro ohybový moment:

$$M = 2M_o = 2 \frac{bt^2}{4} \sigma_o = 2 \frac{F_o \cdot L_m}{2} \quad (2.1.6.2.1.)$$

kde L_m je délkou ramene v ohybu, její vzdálenost je znázorněna na obr. 2.1.6.2.1.



Obr. 2.1.6.2.1: Délka ramene ohybu

Vyjádřením F_o z (2.1.6.2.1.) je získán vzorec pro ohýbací sílu:

$$F_o = \frac{b \cdot t^2}{2 \cdot L_m} \sigma_o = \frac{b \cdot t^2}{2 \cdot L_m} R_m \cdot C \quad (2.1.6.2.2.)$$

V případě použití přidržovače se velikost přidržovací síly volí v rozmezí:

$$F_p = (0,25 - 0,30) \cdot F_o \quad (2.1.6.2.3.)$$

Pokud je materiál kalibrován, dochází k výraznému navýšení ohýbací síly v rozmezí:

$$F_k = (2 - 2,5) \cdot F_o \quad (2.1.6.2.4.)$$

V literatuře [2], [6] jsou uvedeny i jiné způsoby výpočtu ohýbací síly:

$$F_o = \frac{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot R_m}{3 \cdot (r_p + 1,2 \cdot t + r_m)} \quad (2.1.6.2.5.)$$

$$F_o = 0,22 \cdot t \cdot L \cdot R_m \quad (2.1.6.2.6.)$$

$$F_o = (1 + 7 \cdot f) \frac{b \cdot t^2 \cdot R_m}{r + t} \quad (2.1.6.2.7.)$$

2.1.7 Ohýbací práce

Ohýbací práce se dá určit mimo výpočtových vztahů také z grafické závislosti ohýbací síly na zdvihu ohybníku. Její velikost je rovna ploše pod křivkou průběhu ohýbací síly (obr. 2.1.6.1.). Pro zjištění velikosti plochy se nejčastěji využívá určitého integrálu, případně i jiných matematických metod.

2.1.7.1 Výpočet ohýbací práce při ohybu do tvaru „V“

Velikost práce při ohybu do tvaru „V“ je dána vztahem:

$$A = F_o \cdot k_1 \cdot h \quad (2.1.7.1.1.)$$

kde je:

h koncová poloha zdvihu ohýbadla [m]

k_1 koeficient průběhu ohybové síly [-]

Hodnota koeficientu průběhu ohybové síly má podle [7] velikost $k_1 = 1/3$, bývá také značen symbolem m .

V literatuře [5] je uveden i jiný vztah pro výpočet práce:

$$A = F_o \cdot h \cdot \psi \quad (2.1.7.1.2.)$$

kde je:

h pracovní dráha ohybníku [m]

ψ součinitel plnosti diagramu [-]

Součinitel plnosti diagramu nabývá hodnot v rozmezí ($\psi = 0,5 - 0,65$).

2.1.7.2 Výpočet ohýbací práce při ohybu do tvaru „U“

Práci při ohybu do tvaru „U“ udává vzorec:

$$A = F_o \cdot k_2 \cdot h \quad (2.1.7.2.1.)$$

kde je:

h koncová poloha zdvihu ohýbadla [m]

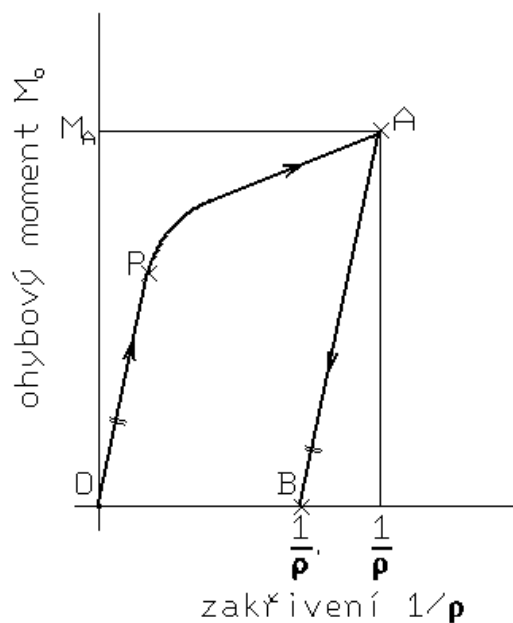
k_2 koeficient průběhu ohybové síly [-]

Hodnota koeficientu průběhu ohybové síly má podle [7] velikost $k_2 = 2/3$.

2.1.8 Odpružení

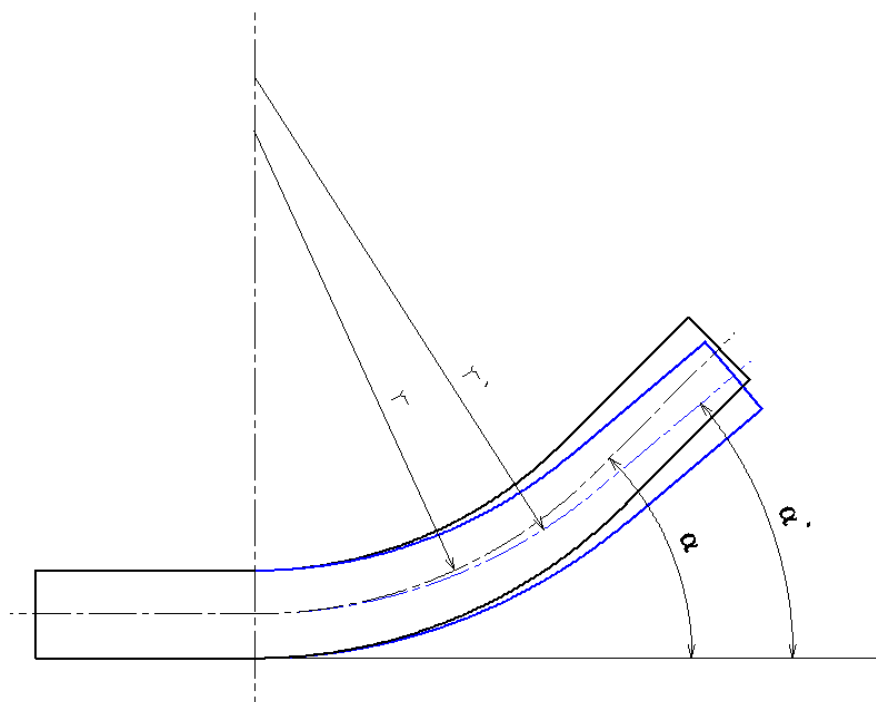
Přestanou-li působit vnější síly na deformované těleso, vrátí se částečně jeho rozměry do původních, tj. těleso odpruží a výsledný tvar ohnuté součásti po odpružení nesouhlasí s tvarem ohýbadla. Zatímco u jiných technologií tváření je odpružení zanedbatelné, při ohýbání má značný význam. Při konstrukci ohýbacích nástrojů je tedy na odpružení nutno brát zřetel a ohýbadla navrhovat tak, aby umožňovala ohyby větší o hodnoty odpružení. Odpružení při ohybu, označované též jako úhlová odchylka γ , se projevuje poklesem zakřivení z hodnoty $1/\rho$ na hodnotu $1/\rho'$. V závislosti ohybového momentu na zakřivení (obr 2.1.8.1.) vzrůstá nejprve ohybový moment po přímce OP, která je pružnou fází procesu zatěžování. V další fázi dochází k plastickým deformacím a v bodě A, kde ohybový moment i křivost dosahují maximálních hodnot, přestanou působit

vnější deformační síly, materiál odlehčí, a nastane zpětná pružná deformace – odpružení. Je způsobeno pásmem pružných deformací v okolí neutrální osy a probíhá po přímce AB, která je rovnoběžná s přímkou OP, pokles zakřivení je v diagramu zřejmý.



Obr 2.1.8.1: Závislost ohybového momentu na zakřivení [8]

Chceme-li tedy získat konečný ohyb součásti s poloměrem r' při úhlu ohybu α' , je nutno během ohýbání součást ohnout více, tj. do poloměru r a úhlu α (obr 2.1.8.2.).



Obr 2.1.8.2: Odpružení při ohýbání [8]

2.1.8.1 Vlivy působící na odpružení

Velikost úhlu odpružení γ závisí na:

- mechanických vlastnostech materiálu – především jeho mezi pevnosti R_m (čím je mez pevnosti „ R_m “ materiálu větší, tím je odpružení větší)
- poloměru ohybu (s rostoucím poloměrem ohybu „ r “ odpružení roste)
- tloušťce materiálu (s rostoucí tloušťkou materiálu „ t “ odpružení klesá), bývá častěji posuzována společně v poměru s poloměrem ohybu jako relativní poloměr ohybu r/t (viz kap. 2.1.2.) (s rostoucím poměrem „ r/t “ odpružení roste)
- úhlu ohybu (s rostoucím úhlem ohybu „ α “ odpružení roste)
- způsobu ohýbání (volný ohyb, ohyb s kalibrováním...) – v případě kalibrace má na velikost odpružení přímý vliv velikost měrného tlaku
- rovnoměrnosti deformace v místě ohybu (s rovnoměrnější deformací je odpružení menší)
- velikosti napětí v oblasti plastické deformace (čím větší bude napětí v oblasti plastické deformace, tím větší bude i plastická deformace, a tím i menší odpružení)
- exponentu deformačního zpevnění n (s rostoucím exponentem deformačního zpevnění „ n “ odpružení klesá)
- poloměru ohybnice (s rostoucím poloměrem ohybnice „ r_m “ odpružení klesá)
- konstrukčním řešením ohýbadla
- vůli mezi činnými částmi ohýbadla
- modulu pružnosti (s rostoucím modulem pružnosti „ E “ odpružení klesá)

atd.

Velkým problémem může být, že se odpružení mění i při zachování stejných technologických podmínek ohýbání, a to vlivem kolísání tloušťky a mechanických vlastností jednoho materiálu. Proto se z hlediska technologičnosti výlisků nemají zmenšovat tolerance rozměrů ohýbaných součástí pod hranici, kterou lze dosáhnout při běžném způsobu ohýbání.

Hodnoty přípustných tolerancí jsou uvedeny v tab. 2.1.8.1.1.

Tab. 2.1.8.1.1: Tolerance úhlu ohybu [9]

Materiál	Poměrný poloměr ohybu r/t		
	< 1	1 až 2	2 až 4
měkká ocel, mosaz	$\pm 15'$	$\pm 30'$	$\pm 1^\circ$
středně tvrdá ocel	$\pm 30'$	$\pm 1,5^\circ$	$\pm 3^\circ$
polotvrdá mosaz, tvrdá ocel	-	$\pm 3^\circ$	$\pm 5^\circ$

Na odpružení má vliv i orientace ohýbané součásti ke směru válcování plechu, protože v různých směrech má tabule plechu vlivem anizotropie různé mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu se ohýbají plechy s orientací 0° ke směru válcování. Podle studie [9] je však pro materiály 11 321, 10 004 a 42 4415 rozdíl ve velikostech odpružení mezi plechy s orientací 0° a 90° ke směru válcování zanedbatelný.

Velikosti odpružení se pohybují v rozsahu 3 až 15° . V závislosti na tvrdosti bývá udáváno odpružení $\gamma \leq 4^\circ$ pro měkké materiály, $\gamma = 2$ až 5° pro středně tvrdé a okolo 15° pro tvrdé materiály. Rozčlenění podle relativního poloměru ohybu v závislosti na materiálu je v tab. 2.1.8.1.2., v závislosti na úhlu ohybu v případě oceli v tab. 2.1.8.1.3.

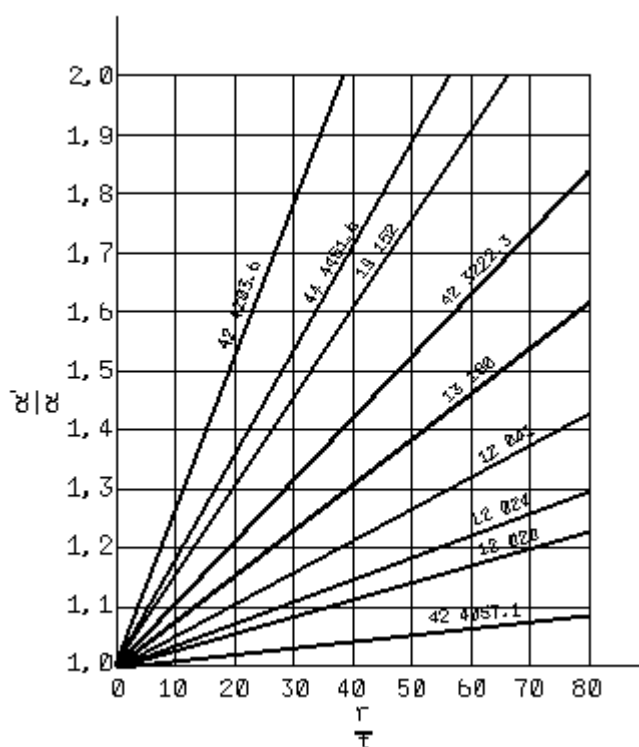
Další rozčlenění odpružení vybraných materiálů podle relativního poloměru ohybu je na obr. 2.1.8.1.1., zde je míra odpružení vyjádřena pomocí poměru α'/α , kde α' značí úhel ohybu po odpružení materiálu a α požadovaný úhel ohybu.

Tab. 2.1.8.1.2: Hodnoty úhlu odpružení pro vybrané materiály [7]

Materiál	r/t	
	0,8 až 2	> 2
Ocel $R_m \leq 320$ MPa	1	3
Ocel $R_m = 320$ až 400 MPa	3	5
Ocel $R_m \geq 400$ MPa	5	7
Mosaz měkká	1	3
Mosaz tvrdá	3	5
Hliník	1	3

Tab. 2.1.8.1.3: Velikosti úhlu odpružení pro ocel [3]

Úhel ohybu α	Stav materiálu	r/t				
		1	2	4	6	10
30°	měkký	1	1	3	4	7
	tvrdý	0	2	5	8	14
60°	měkký	0	1	2	3	5
	tvrdý	0	1	3	5	8
90°	měkký	0	0	1	2	4
	tvrdý	-1	0	2	3	7
120°	měkký	-1	0	0	1	3
	tvrdý	-1	0	1	2	4



Obr. 2.1.8.1.1: Odpružení v závislosti na relativním poloměru ohybu [2]

2.1.8.2. Způsoby zamezení odpružení

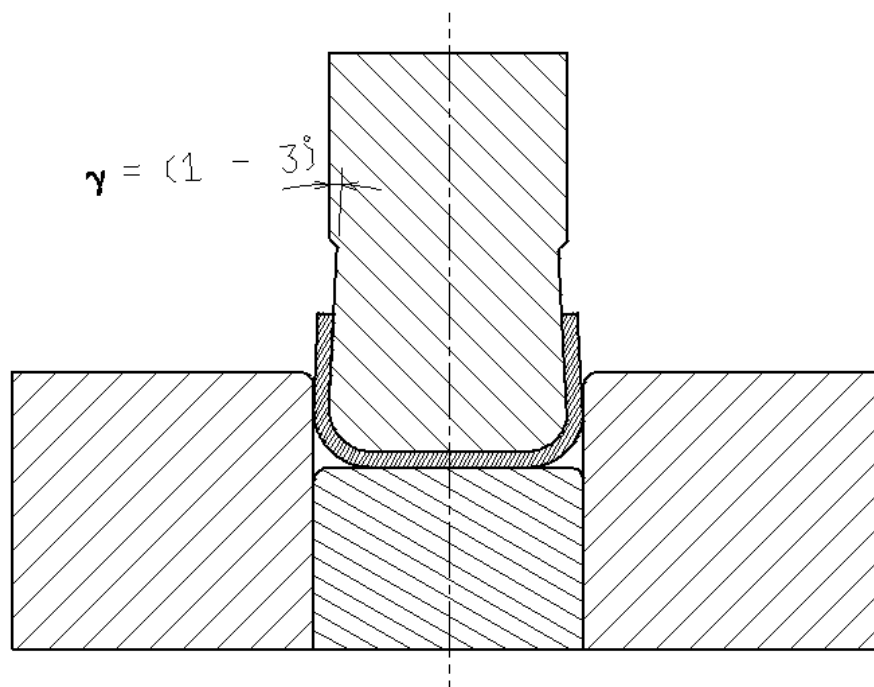
Velikost odpružení lze ovlivňovat technologickými podmínkami procesu ohýbání, kalibrací, či vhodnou úpravou ohýbacího nástroje. Odpružení je možné těmito způsoby předejít, nikoliv však zcela zamezit. Děje se tak zvýšením plastické deformace v místě

ohybu materiálu, případně změnou chování materiálu po odlehčení zatěžující silou v případě konstrukčních úprav ohýbacích nástrojů.

Odpružení lze omezit následujícími způsoby:

- podbroušením ohybníku o úhel γ (obr. 2.1.8.2.1.)

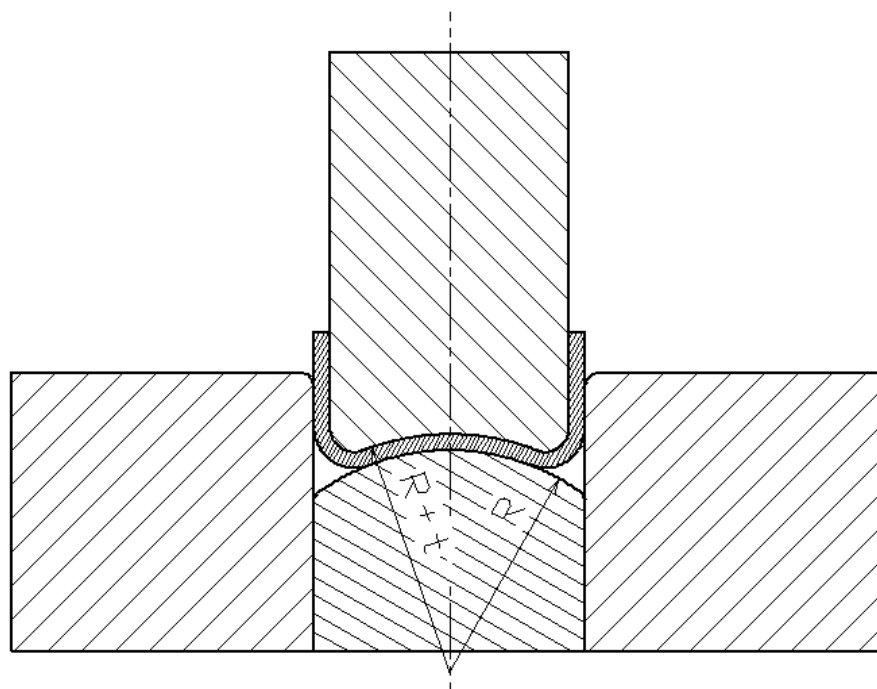
Jedná se o konstrukční úpravu kdy sklon boku ohybníku umožňuje přihnání svislých ramen výlisku (jejich sevření), což vede k omezení odpružení. Tento způsob úpravy nástroje je vhodný pro materiály střední tvrdosti.



Obr. 2.1.8.2.1: Podbroušení ohybníku o úhel γ

- zaoblením spodní hrany ohybníku a přidržovače (obr. 2.1.8.2.2.)

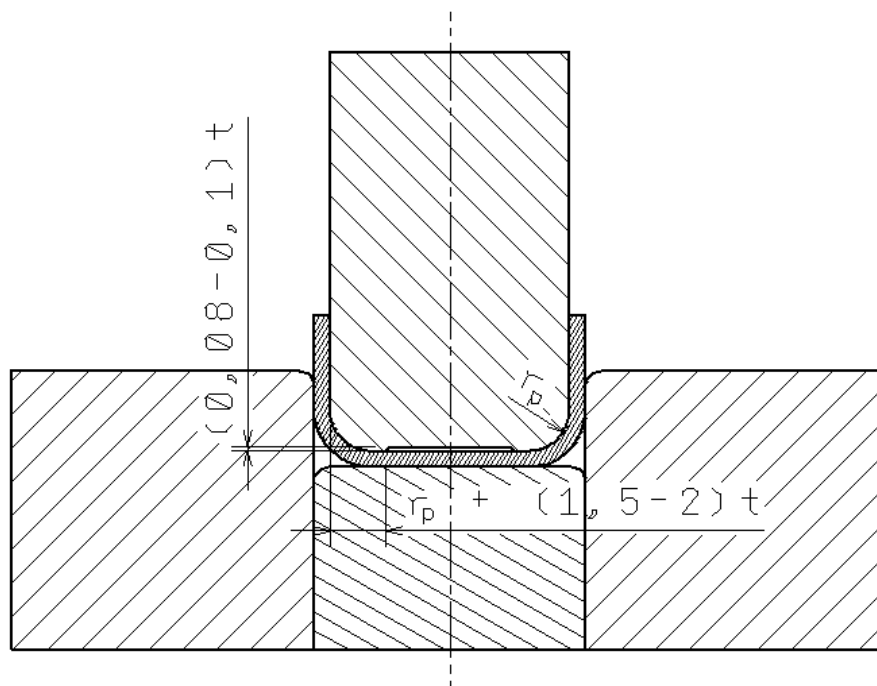
Při této konstrukční úpravě je spodní hrana ohybníku zaoblена poloměrem $R + t$ a přidržovač poloměrem R . Velikost poloměru R se doporučuje ověřit experimentálně. Je však potřeba dávat pozor aby zaoblením dna nedošlo k plastické deformaci výlisku, jeho dno se musí po vyjmutí z nástroje vyrovnat. Zároveň se zaoblení dna musí vytvořit dokud je materiál rovný, jinak by se vytahoval z rohů, a tím by došlo k plastické deformaci.



Obr. 2.1.8.2.2: Zaoblení spodní hrany ohybníku a přidržovače

- zpevněním materiálu v rohu rázem (obr. 2.1.8.2.3.)

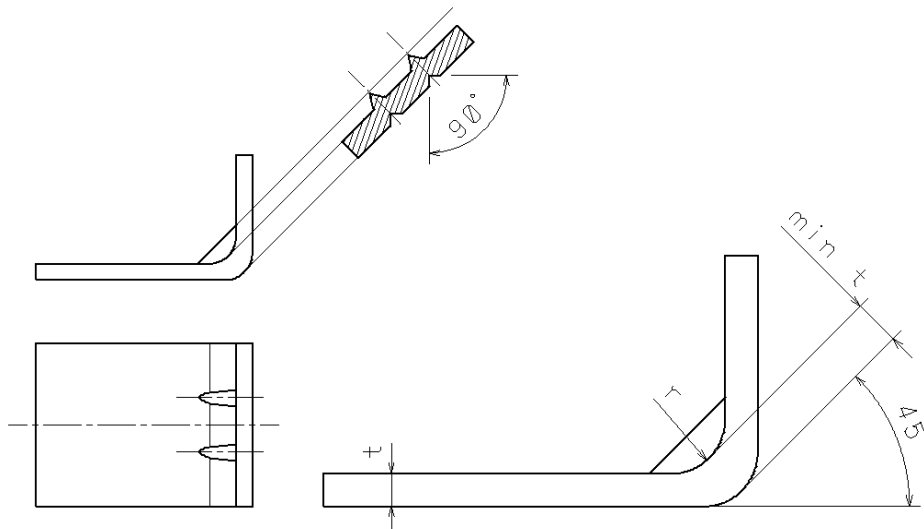
V tomto případě je na ohybníku zhotovena razící hrana, která způsobí zpevnění ohýbaného materiálu v rozích výlisku. Razící hrany se doporučují pro materiály dostatečně tvárné a pro tloušťky polotovaru větší než 1 mm.



Obr. 2.1.8.2.3: Zpevnění materiálu v rohu rázem

- vylisováním vyztužovacího žebra na výlisku (obr. 2.1.8.2.4.)

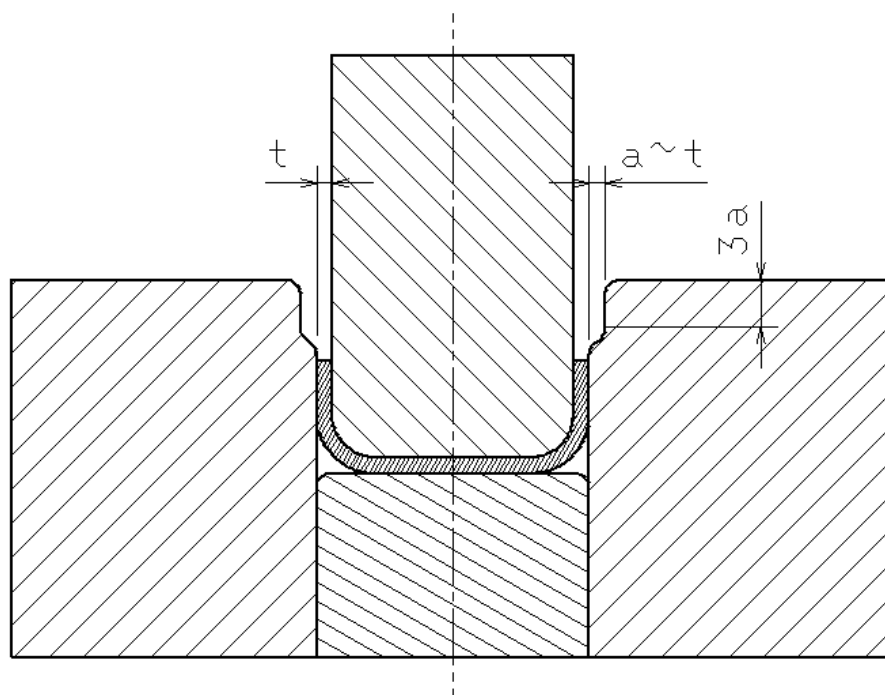
Jde o tvarové vyztužení místa ohybu, které se provede prolisováním žebér vedených kolmo k ose ohybu. Je tím však znemožněno vložení jiné součásti nebo výlisku do rohu vyztuženého výlisku.



Obr. 2.1.8.2.4: Vylisování vyztužovacího žebra

- postupným ohýbáním s odlehčením pevné čelisti o tloušťku materiálu (obr. 2.1.8.2.5.)

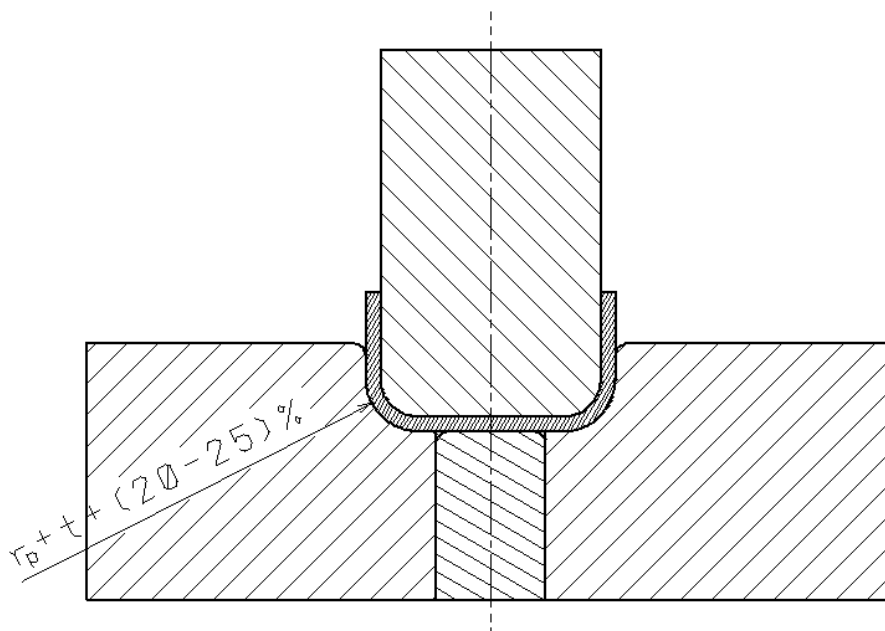
Jedná se o konstrukční úpravu ohybnice, která má ohýbací hranu odlehčenou o tloušťku ohýbaného materiálu, tím je umožněn postupný ohyb výlisku vedoucí k omezení odpružení. Z technologického hlediska dochází k dvojímu ohybu a toto řešení je podobné variantě podbroušení ohybníku o úhel γ . Může však docházet k tomu, že se materiál vzhledem k téměř žádné vůli mezi ohybníkem a ohybnicí a tím vzniklé velké napjatosti může utrhnout, proto je tento způsob řešení doporučen pouze pro některé materiály, především slabé plechy do tloušťky 1 mm.



Obr. 2.1.8.2.5: Odlehčení hrany ohybnice

- zpevněním materiálu deformačním poloměrem ohybnice (obr. 2.1.8.2.6.)

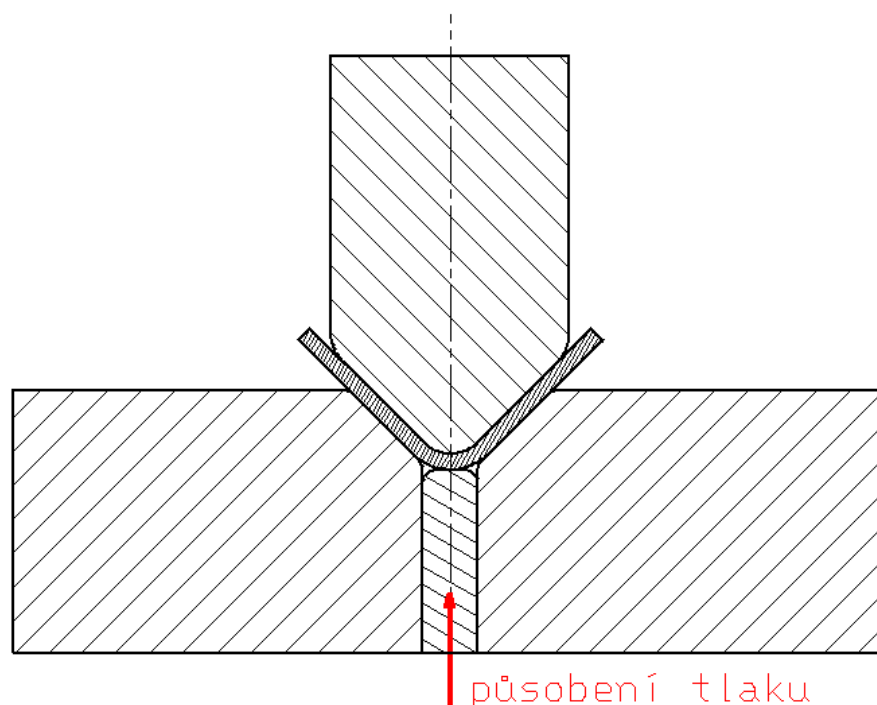
Konstrukční úpravou ohybnice je dosaženo místního zpevnění deformačním poloměrem ohybnice o velikosti $r_p + t + (20 \text{ až } 25) \%$. Nevýhodou této úpravy je značně složitá výroba.



Obr. 2.1.8.2.6: Zpevnění materiálu deformačním poloměrem ohybnice

- omezení odpružení protitlakem (obr. 2.1.8.2.7.)

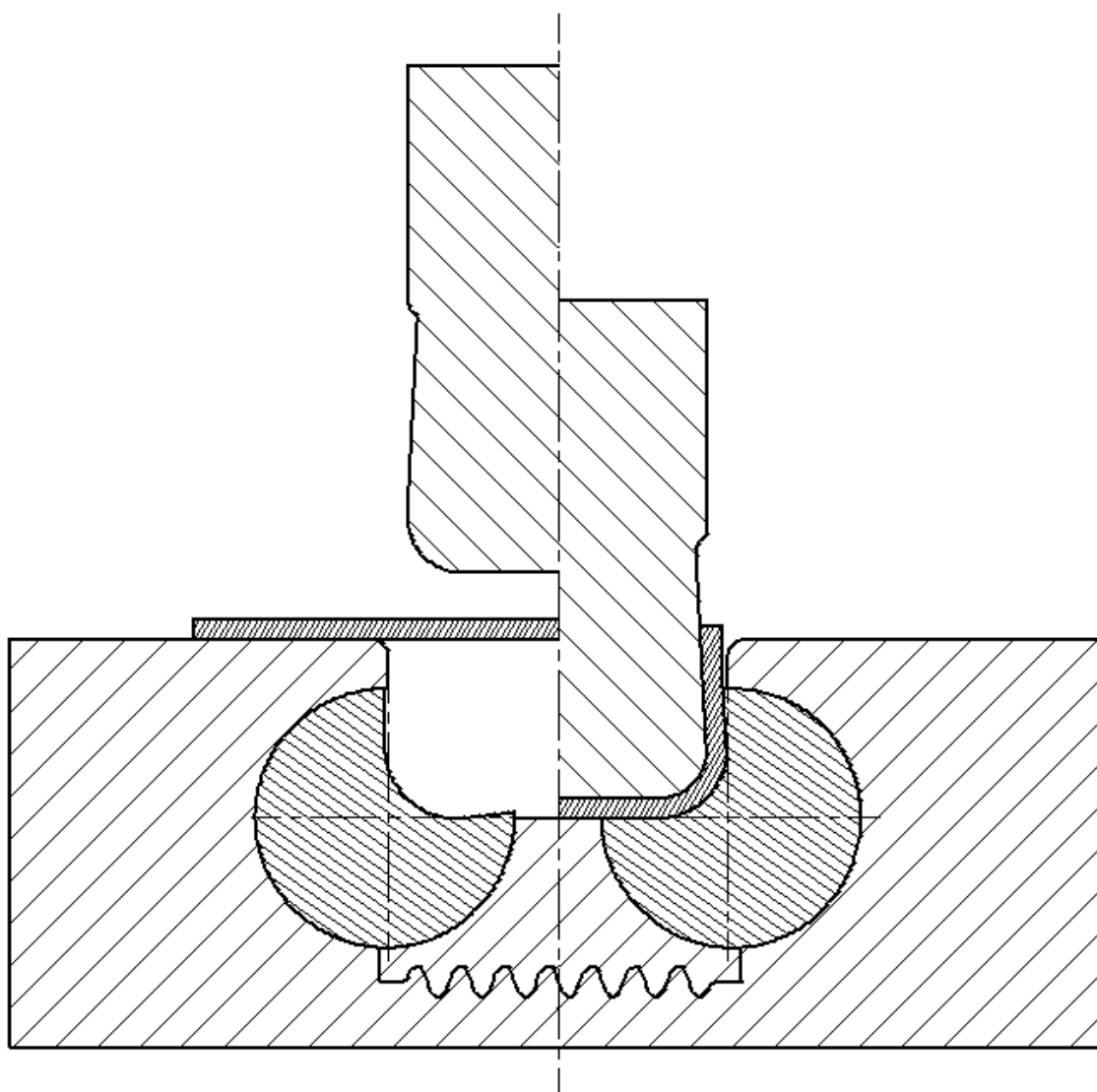
V tomto případě působí v ohybnici protitlak, čímž dojde k dodatečné plastické deformaci, materiál v místě ohybu zpevní a sníží se velikost odpružení.



Obr. 2.1.8.2.7: Omezení odpružení protitlakem [8]

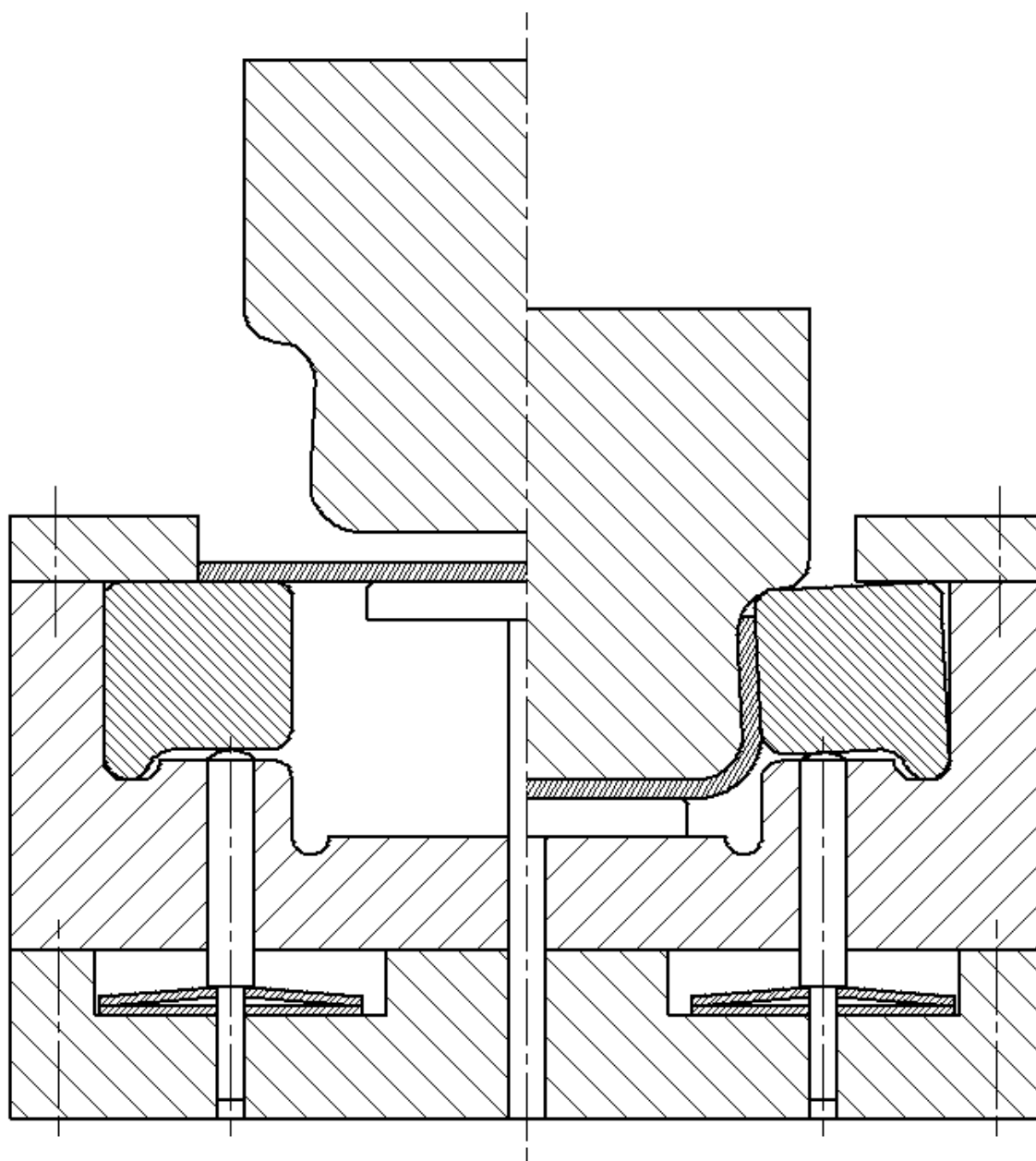
- zvětšením úhlu ohybu přidavným pohybem otočných čelistí ohybnice (obr. 2.1.8.2.8.)

U tohoto řešení dochází k omezení odpružení vlivem kladiček, které svým pootočením natlačí materiál na podbroušený ohybník. Konstrukce může být využívána i pro úhly ohybu větší než 90° . Výrobek se z nástroje vyjímá sesunutím z ohybníku, směrem kolmým k rovině ohybu. V praxi se však tento způsob řešení téměř nevyskytuje.



Obr. 2.1.8.2.8: Otočné čelisti ohybnice [7]

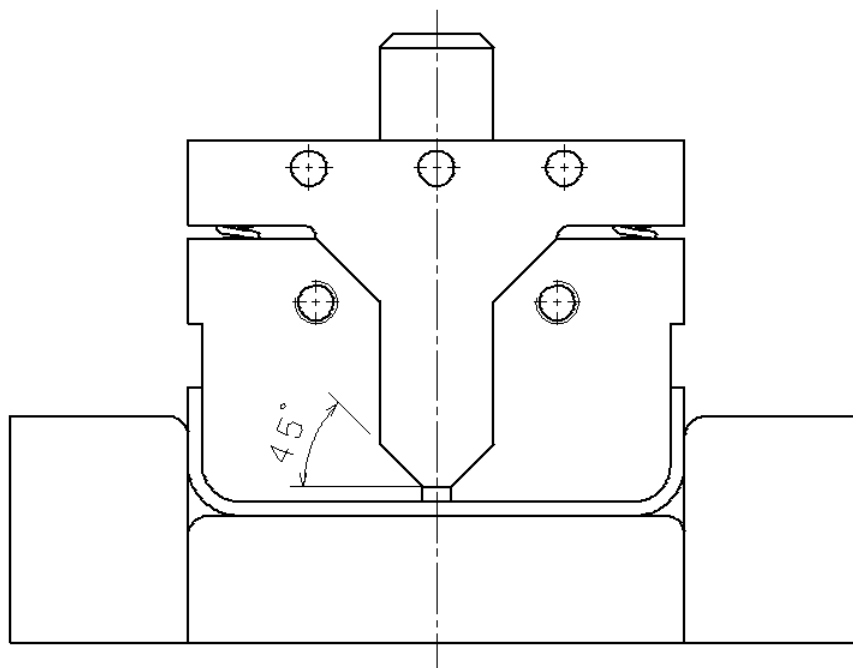
- zvětšením úhlu ohybu přídavným pohybem posuvných čelistí ohybnice (2.1.8.2.9.)



Obr. 2.1.8.2.9: Posuvné čelisti ohybnice [8]

- použitím prolisů na výlisku
- kalibrací

V případě kalibrace zvětšíme lisovací sílu na konci lisovacího cyklu (obr. 2.1.6.1.1.), dochází k místní plastické deformaci v místě ohybu a hodnota odpružení se snižuje, až případně vymizí úplně. Jednu z možností konstrukčního řešení nástroje při kalibraci znázorňuje obr. 2.1.8.2.10., kdy dochází k dolisování ramen profilu zvětšením rozměru ohybníku.



Obr. 2.1.8.2.10: Kalibrace rozpínáním ohybníku [10]

2.1.8.3 Výpočtové vztahy pro odpružení

Pro praktický výpočet odpružení existuje mnoho empirických vztahů a grafů. Mezi základní vztahy pro výpočet odpružení patří následující vzorce [4]:

$$\text{ÚZKÉ PRUTY} \quad \gamma = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} = \frac{2}{t \cdot E} \sigma_{10} \quad (2.1.8.3.1.)$$

$$\text{ŠIROKÉ PÁSY} \quad \gamma = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} (1 - \mu^2) = \frac{2}{t \cdot E} \sigma_{10} (1 - \mu^2) \quad (2.1.8.3.2.)$$

kde je:

σ_{10} ohybové napětí v krajních vláknech [MPa]

l délka středního oblouku ohybu [mm]

Stanovení úhlu odpružení není jednoduché. Dokonce i ČSN 22 7340 uvádí, že v případě požadavku dodržení přesnosti úhlu ohybu je nutno i přes výpočet odpružení experimentálně odzkoušet a podle výsledků zkoušek ohýbadlo upravit [8]. Dále uvádí přibližný výpočet úhlu otevření po odpružení α a poloměru zaoblení ohybníku r_p při ohýbání bez kalibrace (při volném ohýbání):

$$\alpha' = 180 - K(180 - \alpha) \quad (2.1.8.3.3.)$$

$$r_p = K(r + 0,5 \cdot t) - 0,5 \cdot t \quad (2.1.8.3.4.)$$

kde je:

K součinitel dle tab. 2.1.8.3.1.

α' úhel otevření po odpružení [°]

α úhel otevření před odpružením [°]

r poloměr ohybu po odpružení [mm]

Tab. 2.1.8.3.1: Součinitel K pro výpočet úhlu odpružení [11]

Poměr r/t [-]	0,1	0,25	0,5	1	2	3	4
Součinitel K [-]	0,68	0,65	0,62	0,58	0,545	0,53	0,525
Poměr r/t [-]	5	6	8	10	15	20	
Součinitel K [-]	0,522	0,52	0,516	0,514	0,512	0,508	

Dále jsou v případě volného ohybu pro tangentu úhlu odpružení γ udávány vztahy [11]:

- Vztah pro ohýbání do tvaru „V“:

$$\operatorname{tg} \gamma = 0,375 \frac{L}{k \cdot t} \frac{R_e}{E} \quad (2.1.8.3.5.)$$

kde k je součinitel určující polohu neutrální vrstvy dle poměru r/t [-].

- Vztah pro ohýbání do tvaru „U“:

$$\operatorname{tg} \gamma = 0,75 \frac{L_m}{k \cdot t} \frac{R_e}{E} \quad (2.1.8.3.6.)$$

Rameno ohybu L_m se vypočítá podle vzorce:

$$L_m = r_m + 1,2 \cdot t + r_p \quad (2.1.8.3.7.)$$

Součinitel k určující polohu neutrální vrstvy se určí podle vztahu:

$$k = 1 - x \quad (2.1.8.3.8.)$$

kde x je podle [12] součinitel posunutí neutrální osy a určí se z tab. 2.1.2.1., podle [5] se však získá přímo ze vztahu

$$x = -r/t \quad (2.1.8.3.9.)$$

V oblastí malých poměrů r/t je vlivem napjatosti a nesnadným seřazením ohýbadla velmi obtížné použít početních metod, velikost odpružení se v těchto případech stanoví pomocí experimentálních zkoušek, kde v některých případech, kdy poměr r/t je menší než 0,3 a je prováděna kalibrace, může být úhel odpružení i záporný. Větší praktický význam má výpočet odpružení pro poměry r/t větší (5 až 8). K určení velikosti odpružení v oblasti poměru $r/t > (5 \text{ až } 8)$ se doporučuje použít grafickou závislost mezi úhly odpružení a

poměrem r/t , přitom se vliv dalších činitelů neuvažuje. U součástí s velkým poloměrem ohybu, kdy $r/t > 20$, je odpružení větší a je dáno vztahem [10]:

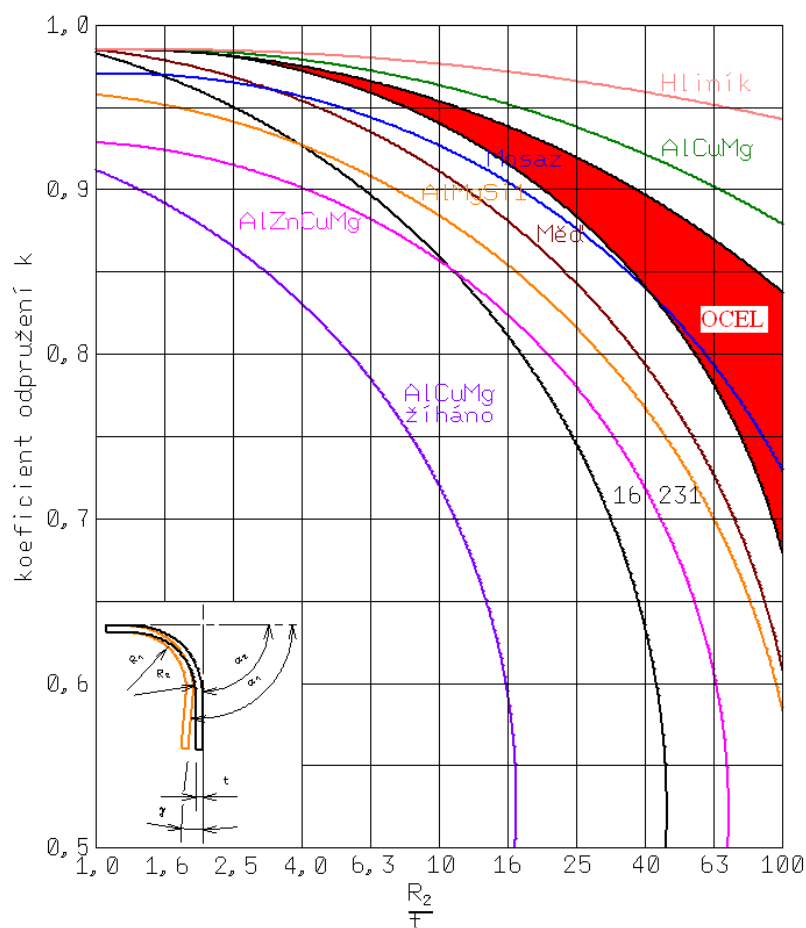
$$\gamma = (180^\circ - \alpha) \left(\frac{R}{r_p} - 1 \right) \quad (2.1.8.3.10.)$$

kde se přibližný poloměr zaoblení ohybníku r_p vypočítá ze vzorce:

$$r_p = \frac{1}{\frac{1}{r} + 3 \frac{R_e}{E \cdot t}} \quad (2.1.8.3.11.)$$

Velikost odpružení lze také zjistit podle obr. 2.1.8.3.1. kde je stanoveno koeficientem

$$K = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{R_1 + 0,5 \cdot t}{R_2 + 0,5 \cdot t} \quad (2.1.8.3.12.)$$



Obr. 2.1.8.3.1: Diagram koeficientů odpružení [4]

Podle [13] platí následující vztah:

$$\frac{r_p}{r'} = 4 \cdot \left(\frac{r_p \cdot R_{p0,2}}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{r_p \cdot R_{p0,2}}{E \cdot t} \right) + 1 \quad (2.1.8.3.13)$$

kde r' je velikost poloměru ohybu materiálu po odpružení.

Za předpokladu vrstvy nulové deformace, která se při ohýbání neprodlouží ani nezkrátí, bude pro tuto vrstvu platit:

$$l = r_p \cdot \alpha = r' \cdot \alpha' \quad (2.1.8.3.14.)$$

kde α' je úhel ohybu ohýbaného materiálu po odpružení. Úpravou a dosazením (2.1.8.3.14.) do (2.1.8.3.13.) pro něj platí vztah:

$$\alpha' = \alpha \cdot \left[4 \cdot \left(\frac{r_p \cdot R_{p02}}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{r_p \cdot R_{p02}}{E \cdot t} \right) + 1 \right] \quad (2.1.8.3.15.)$$

Úpravou rovnice (2.1.8.3.15.) bude velikost odpružení:

$$\gamma = \alpha \cdot \left[4 \cdot \left(\frac{r_p \cdot R_{p02}}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{r_p \cdot R_{p02}}{E \cdot t} \right) + 1 \right] - \alpha \quad (2.1.8.3.16.)$$

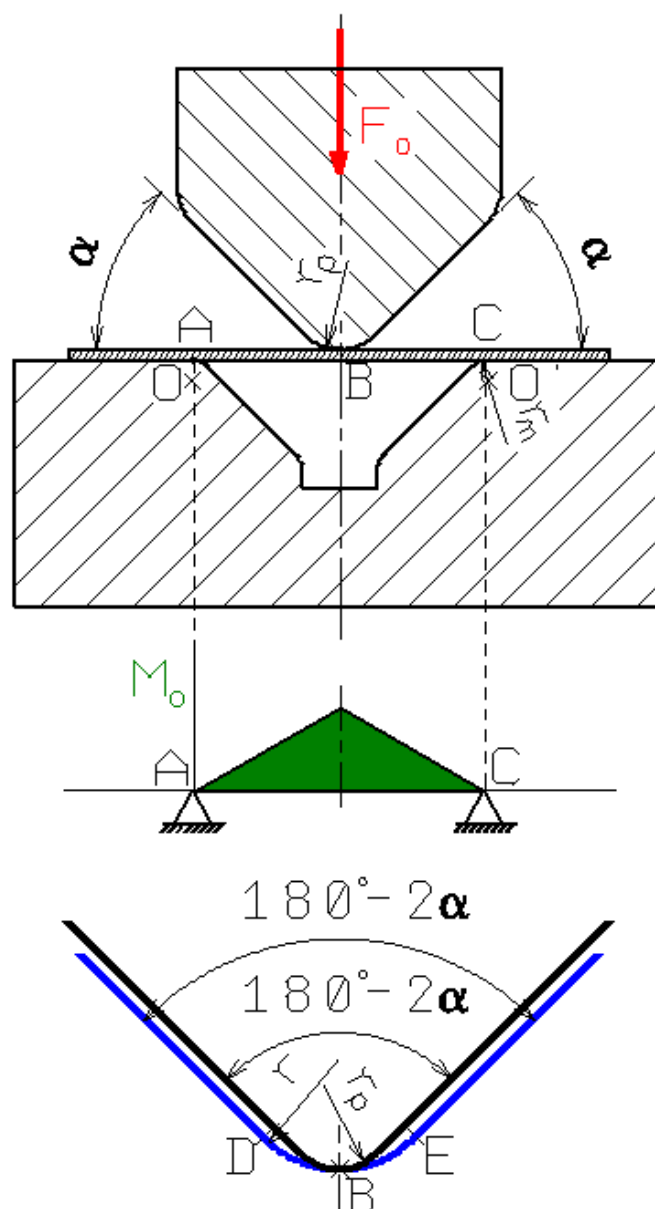
2.1.8.4 Technologický rozbor ohybu

Teoretický rozbor bude proveden pro případ ohybu plochého materiálu do tvaru „V“ ohybníkem o poloměru zaoblení r_p , ramena svírají úhel 90° . Ohybník se pohybuje velmi malou rychlostí směrem k ohybnici přičemž dochází k postupnému ohýbání materiálu. Tento proces je možné rozdělit na tři fáze:

■ První fáze – pružný ohyb

Ohybník působí tlakem na ohýbaný materiál a vyvolává v bodě B pružný ohyb (obr. 2.1.8.4.1.). Ohýbaný plech již nepřiléhá k čelnímu povrchu ohybnice, jen se opírá v bodech A a C. Jsou od sebe vzdáleny přibližně jako středy zaoblení O, O' ohýbacích hran o poloměru r_m . Ohýbaný materiál je namáhán jako nosník na dvou podporách ve středu zatížený silou F_o – tomu odpovídá i rozložení ohybového momentu M_o v podélném směru ohýbaného materiálu. Maximální hodnota ohybového momentu je v působišti síly F_o :

$$M_{oB} = \frac{F_o \cdot L}{4} \quad (2.1.8.4.1.)$$



Obr. 2.1.8.4.1: Rozložení ohybového momentu [14]

Tlakem ohybníku vzrůstá ohybová síla F_o i ohybový moment M_o . V určitém okamžiku dosáhne mezní hodnoty odpovídající začátku plastické deformace. Je dána vztahem:

$$M_{opr} = \frac{bt^2}{6} \sigma_o \quad (2.1.8.4.2.)$$

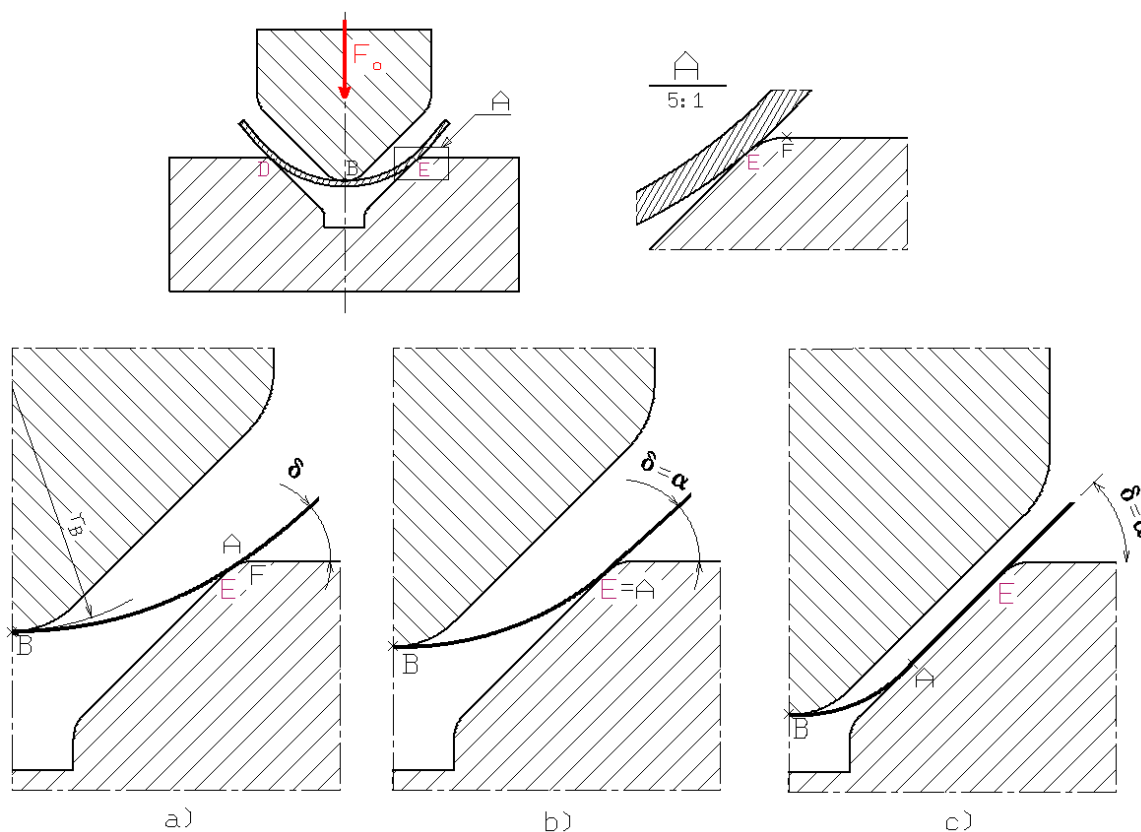
Této mezní hodnoty ohybového momentu je dosaženo nejprve v krajních vrstvách materiálu, a pokud tak nastane, přechází materiál do druhé fáze ohybu.

▪ Druhá fáze – plastický ohyb

Dalším pohybem ohybníku se plastická deformace, původně omezená na průřez pod bodem B, postupně rozšiřuje a zaujímá stále větší úsek vymezený body D a E, jedná

se o body, ve kterých zaoblená hrana ohybnice přechází v přímku (obr. 2.1.8.4.2.). V tomto úseku vzniká trvalý ohyb materiálu o proměnlivém zakřivení, které dosahuje po celou dobu největší hodnoty v bodě B. Současně se zvedají obě ramena ohýbaného materiálu - zvětšuje se úhel δ . Místo dotyku ramena ohýbaného materiálu s ohybnicí představuje bod A, který se posouvá po oblouku EF níže. V místě, kdy se bod A dostane do bodu E, dosahuje úhel obou ramen δ požadované hodnoty úhlu ohybu α . V dalším průběhu se bod A pohybuje směrem dolů po přímkové části ohybnice a stále větší část plechu k ní přiléhá. Na konci druhé fáze ohybu dosáhne ohybový moment M_{opl} hodnoty 1,5 násobku M_{opr} :

$$M_{opl} = \frac{bt^2}{4} \sigma_0 \quad (2.1.8.4.3.)$$



Obr. 2.1.8.4.2: Fáze plastického ohybu [14]

Když touto fází ohýbání končí, mluvíme o volném ohýbání. Takto získaný tvar se zpravidla používá pouze při ohýbání velkých výliseků materiálu větší tloušťky na ohraňovacích lisech.

▪ Třetí fáze – kalibrování

V případech, kdy musí být výlisek ohnutý přesně, např. do kruhového oblouku, nebo je požadavek na dodržení úhlu ohybu s velkou přesností, je nutné výlisek dolisovat

mezi pracovní povrchy ohýbadla. Takovéto dolisování představuje třetí ohýbací fázi ohybu – kalibrování, které je doprovázeno příslušným vzrůstem tlaku ohybníku. Jedná se o jeden ze způsobů zamezení odpružení (viz kap. 2.1.8.2.).

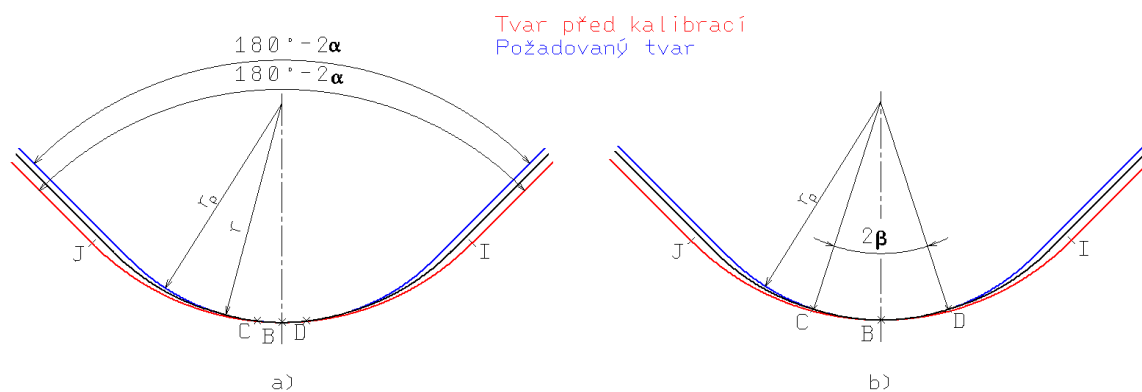
Při ohybu do tvaru U dochází k současnému ohýbání obou ramen polotovaru. Při pohybu ohybníku je jedno z ramen výlisku silně přitlačováno k čelnímu povrchu přidržovačem, zatímco druhé vyčnívající za pohyblivou čelist se ohýbá posuvem po zaoblené ohýbací hraně pevné čelisti. Průběh ohybu je možné stejně jako v případě ohybu do tvaru U rozdělit na výše uvedené tři fáze.

2.1.8.5 Analýza odpružení materiálu při kalibrování

Jak již bylo dříve uvedeno, skládá se technologický rozbor ohybu ze tří fází:

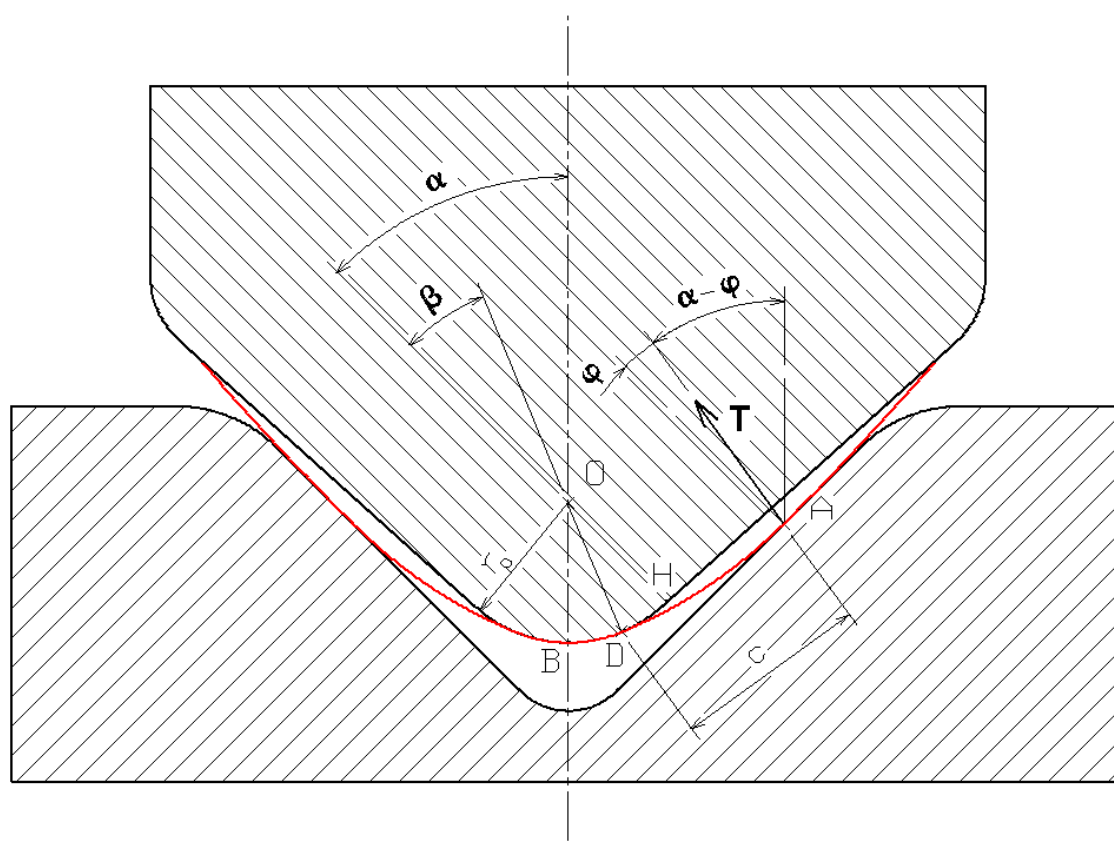
- Pružný ohyb
- Plastický ohyb
- Kalibrování

Ted' bude věnována pozornost analýze odpružení materiálu v době kalibrování pro ohýbání do tvaru „V“. Na obr. 2.1.8.5.1. je v bodě a) červenou barvou znázorněn obrys materiálu po druhé fázi ohybu, kterou je plastický ohyb. Cílem kalibrování je, aby se materiál zkalibroval na poloměr křivosti ohybníku r_p , znázorněný modrou barvou. Na konci druhé fáze ohybu se v bodě B rovná poloměr křivosti materiálu r_B poloměru ohybníku r_p . S rostoucí vzdáleností od bodu B se zakřivení zmenšuje a v bodech I, J přechází do rovných úseků ramen, která spolu svírají požadovaný úhel $180^\circ - 2\alpha$. V úsecích BI a BJ jsou tedy zakřivení, která se liší od požadovaného obrysu. Tato odchylka však ve většině případů nemá podstatný význam vzhledem k dosažení požadovaných rozměrů. Pokud však součást musí být ohnuta přesně do kruhového oblouku nebo je požadována velká přesnost úhlu rozevření ramen, musí se materiál dále kalibrovat.



Obr. 2.1.8.5.1: Obrisy křivek ohýbaného materiálu při kalibraci

Při kalibraci bude stlačování ohybníku způsobovat přiléhání materiálu k ohybníku jak je znázorněno na obr. 2.1.8.5.2. obloukem BD, resp. na obr. 2.1.8.5.1. obloukem CD. Tento oblouk má stejný poloměr křivosti jako ohybník. Bod D, který stanovuje hranici přiléhání se postupně blíží k bodu H, který leží na hranici zaoblené hrany ohybníku. Současně se zmenšuje úhel β , který je měřítkem vzdáleností oblouků BD a BH.



Obr. 2.1.8.5.2: Ohýbaný materiál při kalibraci [14]

K jednoznačnému zmenšení dochází také u vzdálenosti c , která je ramenem síly T působící v bodě A od ohybnice. Síla T je od kolmice k ohybnici v bodě A odchýlena o třecí úhel φ . Pro velikosti úhlů a ramene c platí vztah [14]:

$$\sin(\beta - \varphi) + \sin \varphi = \frac{c}{r_p} (1 - \lambda) \quad (2.1.8.5.1.)$$

a z této rovnice je velikost ramene c :

$$c = \frac{\sin(\beta - \varphi) + \sin \varphi}{1 - \lambda} r_p \quad (2.1.8.5.2.)$$

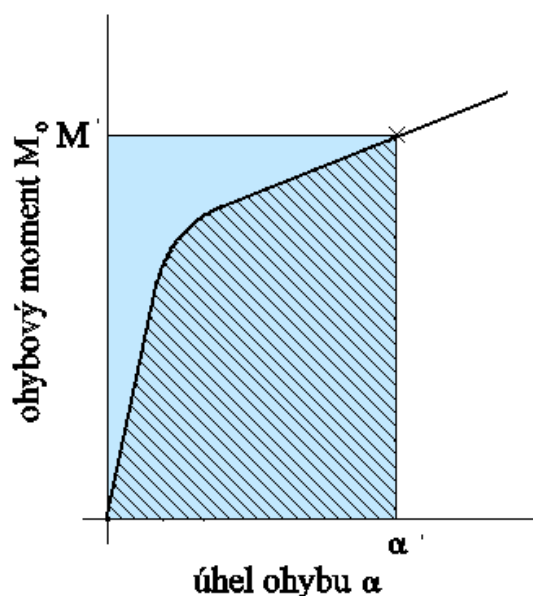
kde je:

φ třecí úhel [°]

λ součinitel plnění [-]

Ve vzorci (2.1.8.5.2.) jsou veličiny r_p a λ konstanty. Součinitel plnění λ je určen poměrem plochy ohraničené momentovou křivkou a plochy odpovídající násobku souřadnic momentu a úhlu ohybu (obr. 2.1.8.5.3.). Platí pro něj vztah:

$$\lambda = \frac{\int_0^{\alpha'} M \, d\alpha}{M' \cdot \alpha'} \quad (2.1.8.5.3.)$$



Obr. 2.1.8.5.3: Určení součinitele plnění [14]

Délka ramene c se se zmenšujícím se úhlem β rovněž zmenšuje. V hraničním případě se setká materiál ohybníku (bod D) s ohybnicí (bod A) v bodě H . Toho však nelze ve skutečnosti dosáhnout jak vyplývá z pozdější analýzy.

Současně se zmenšením ramene c musí růst působící síla T aby byla zachována velikost ohybového momentu M , protože je v bodě D konstantní vzhledem k stabilitě poloměrů ohybu $r_D = r_P$. Vzorec pro velikost síly T má tvar [14]:

$$T = \frac{M}{c} = \frac{1 - \lambda}{\sin(\beta - \alpha) + \sin\varphi} \frac{M}{r_P} \quad (2.1.8.5.4.)$$

Pro osovou sílu tlaku ohybníku, která je zároveň kalibrační silou, platí [14]:

$$P_k = 2 \cdot T \cdot \cos(\alpha - \varphi) \quad (2.1.8.5.5.)$$

Dosažením za sílu T ze vzorce (2.1.8.5.4.) je pro ni získán tvar:

$$P_k = \frac{2c \cos(\alpha - \varphi)}{\sin(\beta - \varphi) + \sin\varphi} \frac{M(1 - \lambda)}{r_P} \quad (2.1.8.5.6.)$$

Ve výše uvedeném vzorci jsou veličiny M , r_P , α a λ konstanty, proto tento vzorec označuje přímou závislost mezi kalibrační silou a tvarem zakřiveného předmětu, jehož ukazatelem je úhel β . Čím menší je úhel β , tím více se blíží tvar ohnutého materiálu ideálnímu obrysu na obr. 2.1.8.5.1., jehož dosažení je cílem kalibrování. Současně se se zmenšujícím úhlem β zvětšuje délka oblouku CD a zmenšují se délky přechodných úseků CJ a DI na obr. 2.1.8.5.1.

Nejpodstatnějším faktem ze vzorce 2.1.8.5.6. je skutečnost, že snížením úhlu β dojde k prudkému nárůstu kalibrační síly P_k . Její prudký nárůst je patrný z obr. 2.1.6.1.1.

Závislost na obr. 2.1.8.5.3. platí pro případ, kdy $\alpha = 60^\circ$. Síla P_{k0} je síla působící na ohybník na konci druhé fáze ohybu a zároveň je rovna kalibrační síle na počátku fáze kalibrování, kdy $\alpha = \beta$. Podle (2.1.8.5.6.) má tvar:

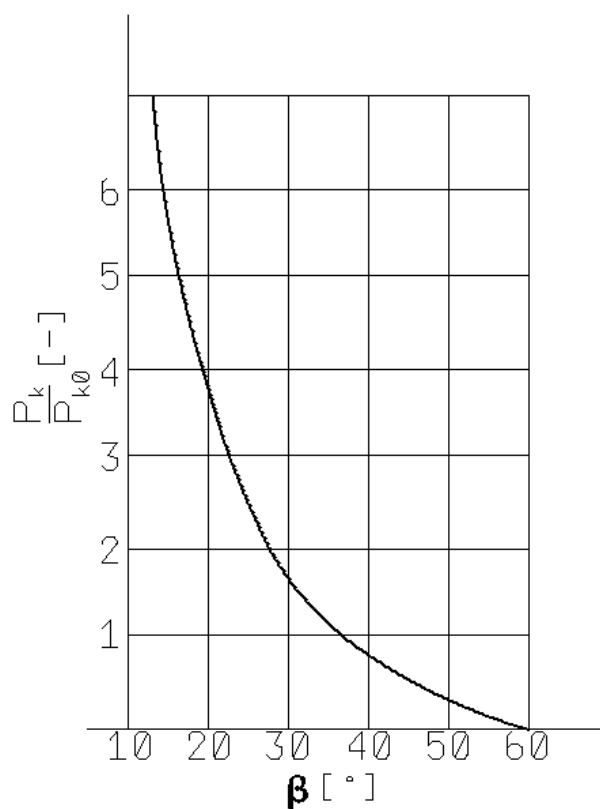
$$P_{k0} = \frac{2c \cos(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha - \varphi) + \sin\varphi} \frac{M(1 - \lambda)}{r_P} \quad (2.1.8.5.7.)$$

Zmenšením úhlu β vzrůstá poměr P_k/P_{k0} , pro snížení úhlu je tedy zapotřebí stálého zvyšování kalibrační síly P_k .

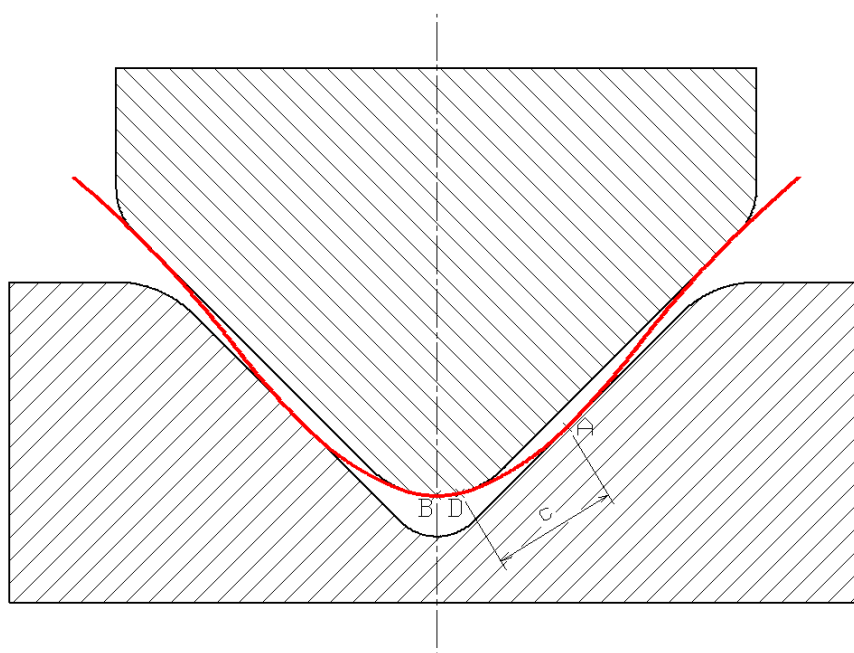
Je jasné, že získání ideálního obrysu, kdy $\beta = 0$ není možné. Bylo by potřeba velmi velkého tlaku, ten se v praxi volí experimentálně, podle požadavků na kalibrovaný výlisek a podle možností strojního zařízení.

Zkrácení délky c mezi body dotyku materiálu s ohybníkem a ohybnicí je příčinou toho, že se dříve ohnuté úseky materiálu posunou za bod dotyku s ohybnicí, označeného A (obr. 2.1.8.5.4.). Postupným vzájemným přibližováním rovnoběžných povrchů ohybníku a ohybnice dojde k opětovnému dotyku těchto vzdálených částí s ohybníkem. Ten způsobí změnu smyslu ohybového momentu a dojde k rozehtutí materiálu. To má zásadní vliv na velikost odpružení. Odpružení materiálu podél oblouku BD způsobuje

vzrůst úhlu rozevření ramen, kdežto odpružení rozevřených úseků ležících za bodem A vyvolává zmenšení tohoto úhlu. Výsledné odpružení kalibrovaného výlisku bude tímto značně menší než při volném ohýbání.



Obr. 2.1.8.5.3: Závislost poměru kalibračních sil na úhlu β [14]



Obr. 2.1.8.5.4: Změna ohybového momentu vlivem dotyku ohybníku

Stav, kdy dochází ke změně ohybového momentu vlivem působení ohybníku v reálném prostředí zachycuje obr. 2.1.8.5.5.



Obr. 2.1.8.5.5: Změna ohybového momentu vlivem dotyku ohybníku při ohýbání materiálu H300 BD Z100 tloušťky 0,8 mm, poloměr ohybu 2,5 mm, kalibrační síla 6 kN

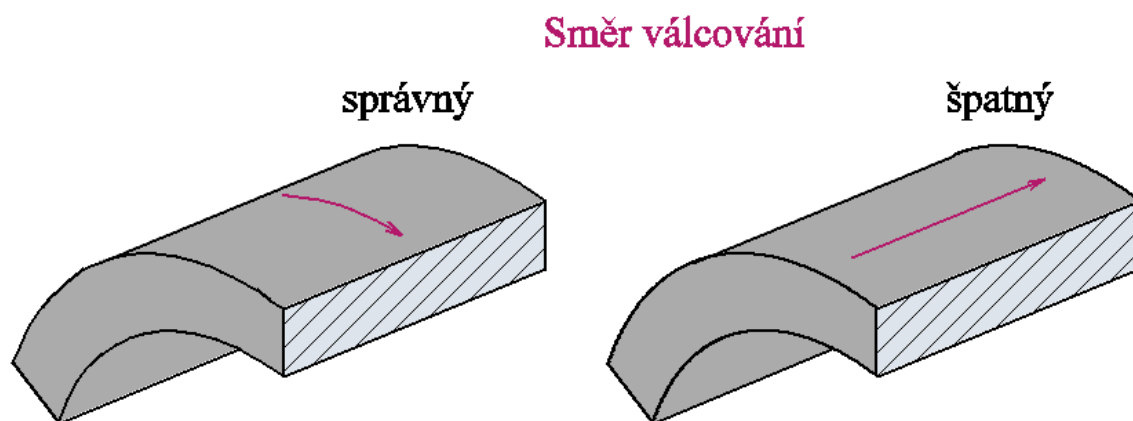
2.1.9 Technologické problémy ohýbání

Mezi technologické problémy ohýbání mimo odpružení, kterému byla věnována pozornost v kap. 2.1.8., patří:

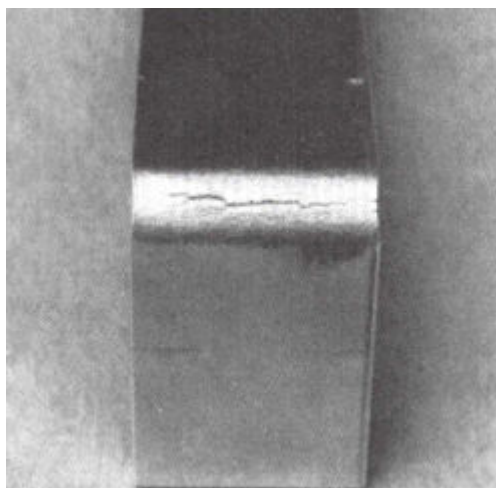
- Praskání materiálu

Vlivem zpevňování oceli dochází ve vnějších vrstvách ohýbaného předmětu ke zvyšování tahového napětí spolu se zvětšováním ohybu. Při určité kritické hodnotě napětí, které je závislé na relativním poloměru ohybu, kvalitě povrchu a dalších faktorech, se soudržnost materiálu poruší a na povrchu ohýbaného předmětu vzniknou trhliny postupující směrem do materiálu. Na praskání má také vliv stav materiálu. Žíhaný materiál snese při stejné tloušťce materiálu menší poloměr ohybu než deformovaný za studena. Praskání také závisí na průběhu vláken. Součástky z plechu je třeba ohýbat tak, aby byl ohyb napříč vláknům, osa ohybu by měla být kolmá na směr vláken materiálu, plech tedy musí mít orientaci 0° ke směru válcování v souladu s obr. 2.1.9.1. Pokud toho nelze docílit, je přípustné ohýbat plech

s orientací až do úhlu 30° ke směru válcování [1]. U dvojitého ohybu se má ohýbat s orientací 45° ke směru válcování. Větší ohybové schopnosti mají plechy menší tloušťky, u nichž dochází k tvorbě trhlin na hranách výlisků. Dokazuje to vzorec 2.1.5.2.2. pro minimální poloměr ohybu. Naopak u tlustších plechů k dochází k prasklině ve středu plechu (obr. 2.1.9.2.). Jakékoliv nerovnosti, trhliny a pukliny, které leží v natahované části materiálu, podporují praskání, neboť bývají zdrojem koncentrace napětí. Proto je třeba stříhané části ohýbat tak, aby byl otřep po stříhání na straně stlačení. Pokud není, je nutné jej odstranit broušením.



Obr. 2.1.9.1: Osa ohybu ve vztahu k směru válcování



Obr. 2.1.9.2: Tvorba trhliny v případě plechů větší tloušťky [13]

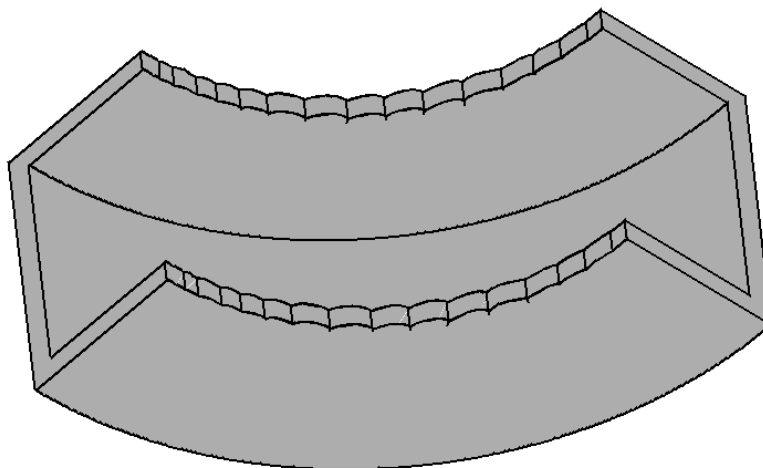
■ Tvorba vln

Při ohýbání předmětů s tenkými stěnami se stěny mohou zvlnit ve stlačené oblasti (obr 2.1.9.3.). Tento jev nastává tehdy, když zkrácení délky

stěny stlačením vyžaduje větší množství práce než její zvlnění. Tvoření vln je možné při ohybu zabránit použitím:

- dodatečné podélné tahové síly při ohýbání
- bočním přitlačením materiálu k nástroji

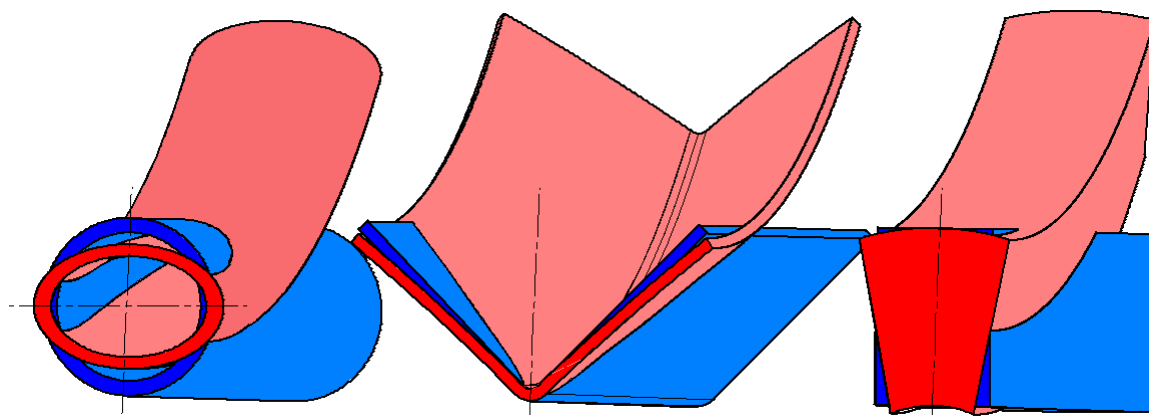
Obě možnosti vyžadují použití speciálního ohýbacího stroje. Boční přitlačení materiálu k nástroji se někdy používá při ohýbání plechů profilů na výšku. Tvářený materiál při tomto ohýbání omezují ze všech stran plochy nástroje.



Obr. 2.1.9.3: Zvlnění profilu během ohýbání [1]

■ Deformace příčného průřezu

Zvětšování příčných rozměrů stlačených vrstev a zmenšování těchto rozměrů na straně tahového namáhání změní tvar příčného průřezu ohýbaného materiálu. Při ohýbání se příčný profil tyčového materiálu obdélníka mění na lichoběžník a dodatečně se zakřivuje v příčném směru, u ostatních tvarů průřezů také dochází k výrazné deformaci (obr. 2.1.9.4.). Největší změny tvaru nastávají při ohýbání úzkých pásů. U širokých pásů, kdy $b \geq 3.t$ k tomu nedochází, protože proti deformacím v příčném směru působí odpor materiálu velké šířky vzhledem k jeho malé tloušťce.



Obr. 2.1.9.4: Deformace příčného průřezu ohybem

2.2 Materiály určené k tváření

Podle normy EN 10027-1 se oceli s dobrými tažnými vlastnostmi označují způsobem uvedeným na obr. 2.2.1.

Druh oceli	Označení oceli					Popis označení
Oceli pro všeobecné ocelové konstrukce	S	-	-	-	-	minimální hodnota R_e
	H	-	-	-	-	minimální hodnota R_e
Hlubokotažné oceli se zvýšením mechanických hodnot					P	oceli legované fosforem
					B	BH oceli
					LA	mikrolegované oceli
					Y	IF oceli
					I	izotropní oceli
	H	T	-	-	-	minimální hodnota R_m
					X	dvoufázové oceli
					T	TRIP oceli
					C	částečně martenzitické oceli

Obr. 2.2.1: Označení ocelí dle EN 10027-1 [15]

V označení se za druhem oceli udává tloušťka pokovené vrstvy. V případě že se jedná o pozinkovaný plech se za označením Z u žárově pozinkovaného plechu nebo ZF u elektrolyticky pozinkovaného plechu udává minimální průměrné množství zinku vztažené na jednotku plochy v g/m^2 .

Lze spočítat, že jednomu μm tloušťky Zn odpovídá přibližně $7,14 \text{ g/m}^2$ hmotnosti na plochu.

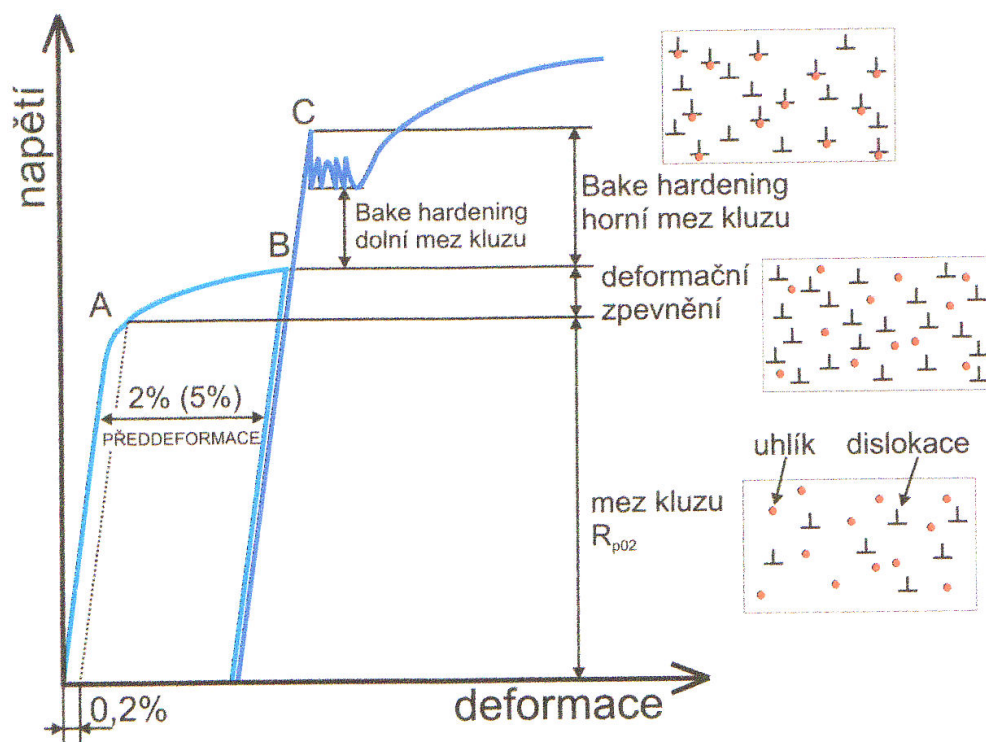
Dle velikosti pozinkované vrstvy se oceli dělí do skupin uvedených v tab.2.2.1.

Tab. 2.2.1: Rozdělení ocelí podle množství zinku [16]

Skupina	Označení	Charakteristika
Slabé pozinkování	Z100	Tento druh pozinku je vhodný pro příznivé podmínky nebo v případě, kdy tvářecí podmínky zabraňují použití silnější pozinkované vrstvy
	Z140	
	Z200	
	Z225	
Standardní pozinkování	Z275	Jedná se o standardní nejběžněji používané pozinkování určené pro všeobecné aplikace
Trvanlivé pozinkování	Z350	Tento druh pozinku zaručuje vyšší životnost oproti ostatním skupinám
	Z450	
	Z600	
Pozinkování slitinou Fe - Zn	ZF100	Používají se k odporovému svařování
	ZF140	

2.2.1 Oceli s BH efektem

Běžné IF oceli mají nízkou a nevýraznou mez kluzu, která je sice výhodná z pohledu tvářitelnosti, ale nevýhodná z hlediska odolnosti proti vtlačení. Proto byly vyvinuty IF oceli, které vykazují BH efekt. BH efekt je, ve své podstatě, umělé stárnutí materiálu. Podmínkou pro použití tohoto principu je přítomnost uhlíku ve formě tuhého roztoku. Stejného efektu lze docílit i u ocelí s přebytkem titanu a niobu, ale celý proces je následně energeticky náročnější, protože uhlík potřebný pro vytvrzovací efekt se musí získat rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žhání na kontinuální lince s následným rychlým ochlazením. Podle standardních podmínek používaných v automobilovém průmyslu je vznik BH efektu realizován za podmínek dodávání tepla ($T = 170\text{ °C}$) po dobu přibližně 20 minut. Následkem tohoto procesu je zvýšení meze kluzu o 40 až 70 MPa (obr. 2.2.1.1.). Velikost BH efektu je z hlediska chemického složení závislá na obsahu uhlíku, manganu a síry. Dále závisí na historii tváření (válcování) za studena a na parametrech rekrystalizačního žhání.



Obr. 2.2.1.1: Princip vzniku BH efektu

Chemické složení ocelí s BH efektem dle EN 10292 : 2000 je uvedeno v tab. 2.2.1.1., jejich základní mechanické vlastnosti v tab. 2.2.1.2.

Tab 2.2.1.1: Chemické složení BH ocelí podle EN 10292:2000 [16]

označení oceli	C	Mn	Si	Al	P	S	Ti	Nb
	max	max	max	min	max	max	max	max
H180BD	0,04	0,70	0,50	0,02	0,06	0,025	0,22	0,22
H220BD	0,06	0,70	0,50	0,02	0,08	0,025	0,22	0,22

Tab 2.2.1.2: Mechanické vlastnosti BH ocelí podle EN 10292:2000 [17]

označení oceli	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]	r ₉₀ [-]	n ₉₀ [-]	obsah Zinku
H180 BD	180 – 240	300 – 360	34	1,5	0,16	Z 70 – Z 200
H220 BD	220 – 280	320 – 400	32	1,2	0,15	Z 70 – Z 200
H260 BD	260 – 320	360 – 440	28	-	-	Z 70 – Z 200
H300 BD	300 – 360	400 – 480	26	-	-	Z 70 – Z 200

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bylo stanovení vlivu mechanických hodnot a kalibrační síly na velikost odpružení při ohýbání. Zkoušenými materiály byly hlubokotažné plechy s rozdílnými mechanickými vlastnostmi a v případě jednoho druhu materiálu byla různá tloušťka plechu. Pro všechny druhy materiálů byla provedena statická zkouška tahem ke zjištění mechanických hodnot, dále byl určen koeficient normálové anizotropie k identifikaci směru válcování.

Bylo provedeno ohýbání s kalibrací, kde byly všechny vzorky kalibrovány stejnými silami, aby byla možnost jejich vzájemného porovnání. U každého materiálu byla jedna sada vzorků ohýbána volně, vznikla tím možnost porovnání ohýbání s kalibrací s volným ohybem pro všechny materiály a tím ukázat klady kalibrace ve vztahu k eliminaci odpružení. Ohýbací síla v případě volného ohybu byla dána odporem materiálu. Měření bylo provedeno na 5 ohybnících o různých poloměrech ohybu. Pro každou kombinaci technologických podmínek byly voleny 4 vzorky.

Odpružení bylo zjišťováno měřením na Profil-Projektoru 320 pro každý měřený vzorek.

Výsledné závislosti kalibrační síly a mechanických hodnot na odpružení jsou v tabulkách a grafech v kap. 3.4.4.

3.1 Příprava vzorků

Vzorky byly odebírány z tabulí plechů. Vzhledem k tomu, že tabule plechů vykazují určitý rozptyl mechanických vlastností, jedním z důležitých předpokladů pro řešení zadané problematiky je skutečnost, že vzorky určitého materiálu pro dané zkoušky musí být odebrány pouze z jedné tabule.

Vzorky byly stříhány na tabulových nůžkách v prostorách TU Liberec (obr.3.1.1.). Případné vzniklé otřepy po stříhání byly mechanicky odstraněny. Všechny vzorky pro zkoušku ohybem bylo nutné označit a stříhat tak, aby byly následně ohýbány kolmo k ose ohybu, tedy s orientací 0° ke směru válcování. Statická zkouška tahem byla provedena standardně pro vzorky odebrané ve směru 0° , 45° , 90° vůči směru válcování.

Z hlediska spotřeby materiálu bylo pro statickou zkoušku tahem včetně určení koeficientu normálové anizotropie potřeba 10 kusů plechu o rozměrech 30 x 230 mm, pro

zkoušku ohybem 100 kusů plechu o rozměrech 20 x 60 mm pro každý druh materiálu dané tloušťky.



Obr.3.1.1: Tabulové nůžky

3.2 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je dle ČSN EN 10002-1 považována za nejdůležitější a nejčastěji používanou zkoušku pro zjištění mechanických hodnot materiálu v oblasti tváření.

Z hodnot naměřených při statické zkoušce tahem lze odvodit celou řadu ukazatelů a významných parametrů. Mezi nejvýznamnější patří např. tažnost, exponent deformačního zpevnění nebo koeficient normálové anizotropie které jsou dány příslušnou normou.

Statická zkouška tahem je založena na postupném zatěžování vzorku až do jeho porušení. Zpravidla se neprovádí přímo na součástech, ale na zkušebních tyčích, kde jsou jejich rozměry a tvar normalizovány. Středy vzorku jsou tvarovány (zúženy) tak, aby zde působilo homogenní napětí a konce vzorku jsou rozšířeny tak, aby je bylo možné upnout do trhačského zařízení. Experiment se provádí při konstantní teplotě a zajímají nás tři proměnné veličiny, kterými jsou napětí, deformace a rychlost deformace.

Nejběžněji používaná je zkouška s konstantní rychlostí deformačního stroje. Při ní je zkušební vzorek upnut na jedné straně v pevné části a na druhé straně v pohyblivé části stroje pohybující se předepsanou deformační rychlostí. Na druhém konci je snímán průběh zatěžující síly.

Při vyhodnocení se sleduje závislost smluvního napětí R na poměrném prodloužení ε . Smluvní napětí je definováno vztahem:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (3.2.1.)$$

kde F je deformační síla [N].

Poměrné prodloužení je dáno vztahem:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2.2.)$$

kde je:

l délka deformovaného vzorku [mm]

l_0 původní délka vzorku [mm]

Pokud materiál nevykazuje výraznou mez kluzu, tak se vzhledem k obtížnosti určení hranice mezi pružnou a plastickou deformací používá tzv. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, což je hodnota způsobující plastickou deformaci $\varepsilon = 0,2 \%$. Další podstatnou veličinou je smluvní mez pevnosti R_m , pro kterou platí:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (3.2.3.)$$

kde F_m je maximální deformační síla [N].

Tažností se rozumí trvalé prodloužení vzorku, při kterém dojde k jeho přetržení, platí pro ni vztah:

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (3.2.4.)$$

kde je:

l_u délka vzorku po přetržení [mm]

l_0 počáteční délka vzorku [mm]

V těchto předchozích vztazích byly uvedeny smluvní hodnoty vztažené k původnímu průřezu zkušebního vzorku, ale jelikož dochází v průběhu zatěžování k jeho změně, musí se tento fakt zohlednit a pak platí:

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad (3.2.5.)$$

$$\varphi = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln (1 + \varepsilon) \quad (3.2.6.)$$

Grafická závislost skutečné deformace na skutečném napětí se v oblasti rozvinutých plastických deformací popisuje matematickým vztahem. Při deformaci vyšší než odpovídá mezi pevnosti se křivka nepopisuje, protože začíná docházet k tvorbě krčku a přestává platit zákon o zachování objemu. Nejvhodnějším popisem závislosti skutečné deformace na skutečném napětí v oblasti rozvinutých plastických deformací je mocninná závislost ve tvaru:

$$\sigma = c \cdot \varphi^n \quad (3.2.7.)$$

kde c je aproximační konstanta nazývaná koeficient monotónního zpevnění a n je rovněž aproximační konstanta nazývaná exponent deformačního zpevnění. Obě konstanty popisují chování materiálu při tváření. Důležitější z hlediska tváření je exponent deformačního zpevnění, který může být posuzován jako míra rovnoměrnosti deformace při tváření. Koeficient monotónního zpevnění je spíše mírou mechanických vlastností materiálu.

Pro zanedbání odklonu křivky od osy s nulovou deformací v oblasti pružných deformací je snahou, aby pro smluvní mez kluzu byla deformace nulová. V této souvislosti se do vztahu (3.2.7.) zahrnuje offsetová deformace φ_0 :

$$\varphi_0 = \sqrt[n]{\frac{R_{p0,2} \cdot (1 + 0,002)}{c}} - \ln(1 + 0,002) \quad (3.2.8.)$$

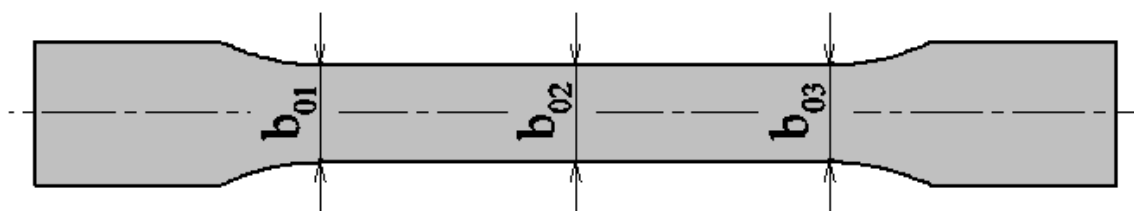
a průběh křivky v oblasti rozvinutých plastických deformací bude popsán tvarem:

$$\sigma = c \cdot (\varphi + \varphi_0)^n \quad (3.2.9.)$$

3.2.1 Měření a vyhodnocení statické zkoušky tahem

Statická zkouška tahem byla provedena v souladu s normou ČSN EN 10002-1 standardně pro vzorky odebrané ve směru 0° , 45° a 90° vůči směru válcování.

Pro zjištění počátečního průřezu byly měřeny šířky a tloušťky zkušebních tyček. Šířky zkušebních tyček byly měřeny na třech místech podle schématu na obr. 3.2.1.1., pro výpočet počátečního průřezu bylo použito aritmetického průměru naměřených hodnot.



Obr. 3.2.1.1: Schéma měření šířek zkušební tyčky

Měření proběhlo na zařízení TiraTest 2300 v laboratořích KSP TU v Liberci (obr. 3.4.2.1.). Zařízení obsahuje software na snímání dat LabTest v.3.12, který slouží k vyhodnocování výsledků.

Po upnutí vzorku do čelistí byla tyčka natahována, její deformace byla měřena průtahoměrem MFN-A, kterým bylo dosaženo větší přesnosti než při měření ohybu. Rychlost posuvu byla pro všechny vzorky konstantní, její velikost byla 10 mm/min.

LabTest v.3.12 nasnímaná data vyhodnotil. Výsledkem jsou mechanické hodnoty zkoušených materiálů uvedených v tab. 3.2.2.1., 3.2.2.4., 3.2.2.7. a 3.2.2.10. včetně výpočtu aritmetického průměru a směrodatné odchylky pro každou měřenou veličinu.

Exponenty deformačního zpevnění a koeficienty monotónního zpevnění byly zjišťovány v souladu s normami ČSN EN 10 002-1 a ČSN 42 0310. Jejich velikosti odpovídají tvaru (3.2.9.) pro každý měřený vzorek. Výsledné hodnoty obou aproximačních konstant jsou uvedeny v tabulkách v kap. 3.2.2.

3.2.2 Výsledky statické zkoušky tahem

Pro materiál H180 BD Z100 tloušťky 0,8 mm jsou mechanické hodnoty uvedeny v tab. 3.2.2.1., velikosti koeficientů monotónního zpevnění v tab. 3.2.2.2. a exponentů deformačního zpevnění v tab. 3.2.2.3.

Tab. 3.2.2.1: Mechanické vlastnosti materiálu H180 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H180 BD Z100						
tloušťka 0,8 mm						
směr odběru	číslo vzorku	S_0 [mm ²]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80} [%]
0°	1	15,28	212,12	320,94	23,41	40,27
	2	15,28	211,56	319,66	23,93	39,94
	3	15,28	211,13	319,47	23,62	39,63
	4	15,28	210,76	318,94	23,21	40,29
	5	15,28	209,94	319,82	23,69	39,89
	aritmetický průměr		211,10	319,77	23,57	40,00
	směrodatná odchylka		0,82	0,74	0,27	0,28
45°	1	15,27	216,10	322,62	22,33	37,74
	2	15,27	216,25	322,24	22,12	37,63
	3	15,27	216,90	322,65	21,87	38,51
	4	15,27	216,66	321,83	22,06	38,08
	5	15,27	217,12	322,30	21,94	38,37
	aritmetický průměr		216,60	322,31	22,06	38,06
	směrodatná odchylka		0,43	0,31	0,18	0,38

Tab. 3.2.2.1: Mechanické vlastnosti materiálu H180 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H180 BD Z100						
tloušťka 0,8 mm						
směr odběru	číslo vzorku	S_0 [mm ²]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80} [%]
90°	1	15,27	220,15	319,20	22,95	40,49
	2	15,27	218,93	318,88	22,01	38,66
	3	15,27	219,42	318,73	22,20	40,08
	4	15,27	218,29	317,18	21,96	38,24
	5	15,27	212,15	319,57	23,16	40,23
	aritmetický průměr		217,79	318,71	22,45	39,54
	směrodatná odchylka		3,22	0,91	0,56	1,02

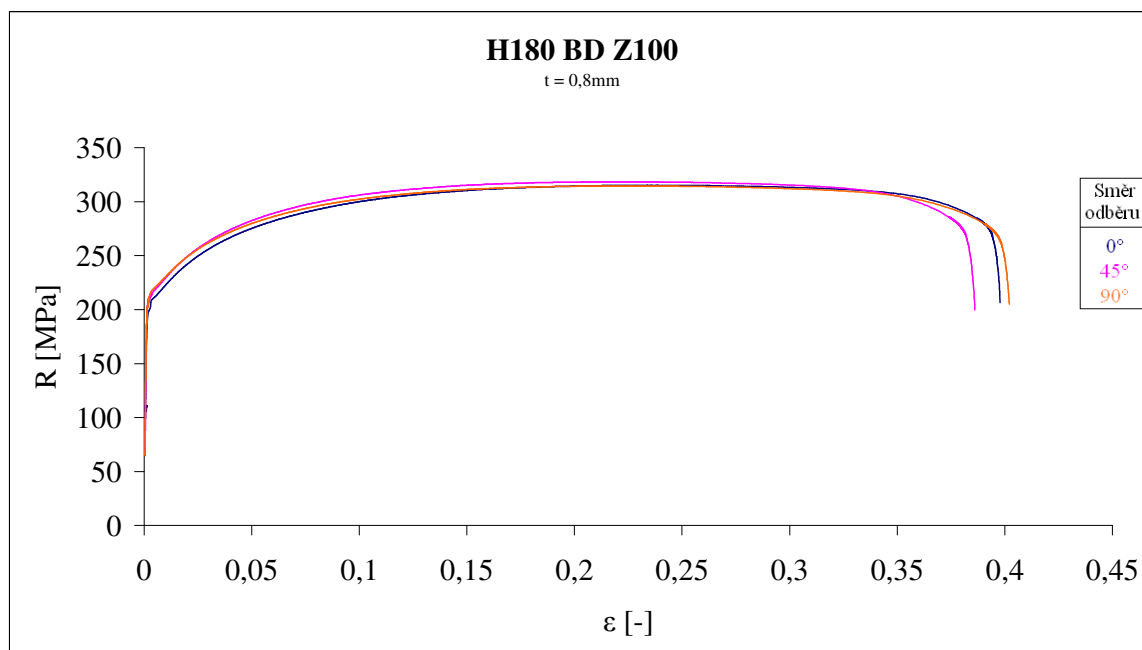
Tab. 3.2.2.2: Koeficienty monotónního zpevnění materiálu H180 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H180 BD Z100							
tloušťka 0,8 mm							
	číslo vzorku	ČSN EN 10 002-1			ČSN 42 0310		
		Směr odběru			Směr odběru		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
koeficient monotónního zpevnění	1	547,57	538,26	532,56	547,12	539,28	533,09
	2	544,03	537,82	534,76	544,17	538,65	534,83
	3	543,42	537,19	532,18	544,01	538,27	532,28
	4	543,62	538,01	529,17	543,58	538,16	529,30
	5	545,09	538,78	543,64	545,66	539,61	544,33
	aritmetický průměr	544,75	538,01	534,46	544,91	538,79	534,77
	směrodatná odchylka	1,71	0,58	5,50	1,46	0,63	5,71

Tab. 3.2.2.3: Exponenty deformačního zpevnění materiálu H180 BD Z100,
tloušťka 0,8 mm

H180 BD Z100							
tloušťka 0,8 mm							
	číslo vzorku	ČSN EN 10 002-1			ČSN 42 0310		
		Směr odběru			Směr odběru		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
exponent deformačního zpevnění	1	0,2223	0,2070	0,2080	0,2219	0,2080	0,2084
	2	0,2209	0,2072	0,2125	0,2210	0,2081	0,2123
	3	0,2203	0,2058	0,2084	0,2213	0,2069	0,2083
	4	0,2220	0,2085	0,2079	0,2217	0,2085	0,2079
	5	0,2215	0,2083	0,2202	0,2222	0,2092	0,2210
	aritmetický průměr	0,2214	0,2074	0,2114	0,2216	0,2081	0,2116
	směrodatná odchylka	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$

Vliv směru válcování v závislosti $\sigma = f(\varphi)$ pro materiál H180 BD Z100 tloušťky 0,8 mm představuje obr. 3.2.2.1.



Obr. 3.2.2.1: Vliv směru válcování v závislosti $\sigma = f(\varphi)$, materiál H180 BD Z100,
tloušťka 0,8 mm

Pro materiál H220 BD Z100 tloušťky 0,8 mm jsou mechanické hodnoty uvedeny v tab. 3.2.2.4., velikosti koeficientů monotónního zpevnění v tab. 3.2.2.5. a exponentů deformačního zpevnění v tab. 3.2.2.6.

Tab. 3.2.2.4: Mechanické vlastnosti materiálu H220 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H220 BD Z100						
tloušťka 0,8 mm						
směr odběru	číslo vzorku	S_0 [mm ²]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80} [%]
0°	1	16,26	277,09	376,04	17,61	30,26
	2	16,26	276,63	375,80	18,12	30,90
	3	16,26	275,80	375,23	18,02	31,31
	4	16,26	271,68	375,30	17,64	31,28
	5	16,26	276,18	375,24	17,88	31,17
	aritmetický průměr		275,48	375,52	17,86	30,98
	směrodatná odchylka		2,18	0,37	0,23	0,44
45°	1	16,26	285,58	384,53	16,76	27,47
	2	16,26	286,41	384,97	16,52	28,71
	3	16,26	288,12	386,26	16,69	29,31
	4	16,26	287,63	385,35	17,02	29,07
	5	16,26	285,34	384,17	16,44	29,60
	aritmetický průměr		286,62	385,06	16,68	28,83
	směrodatná odchylka		1,23	0,81	0,23	0,83
90°	1	16,26	283,54	378,20	17,83	32,17
	2	16,26	279,93	378,27	17,49	32,89
	3	16,26	282,76	377,62	17,73	31,58
	4	16,26	282,63	377,18	17,56	31,30
	5	16,26	282,22	378,49	17,13	30,87
	aritmetický průměr		282,22	377,95	17,55	31,76
	směrodatná odchylka		1,37	0,54	0,27	0,79

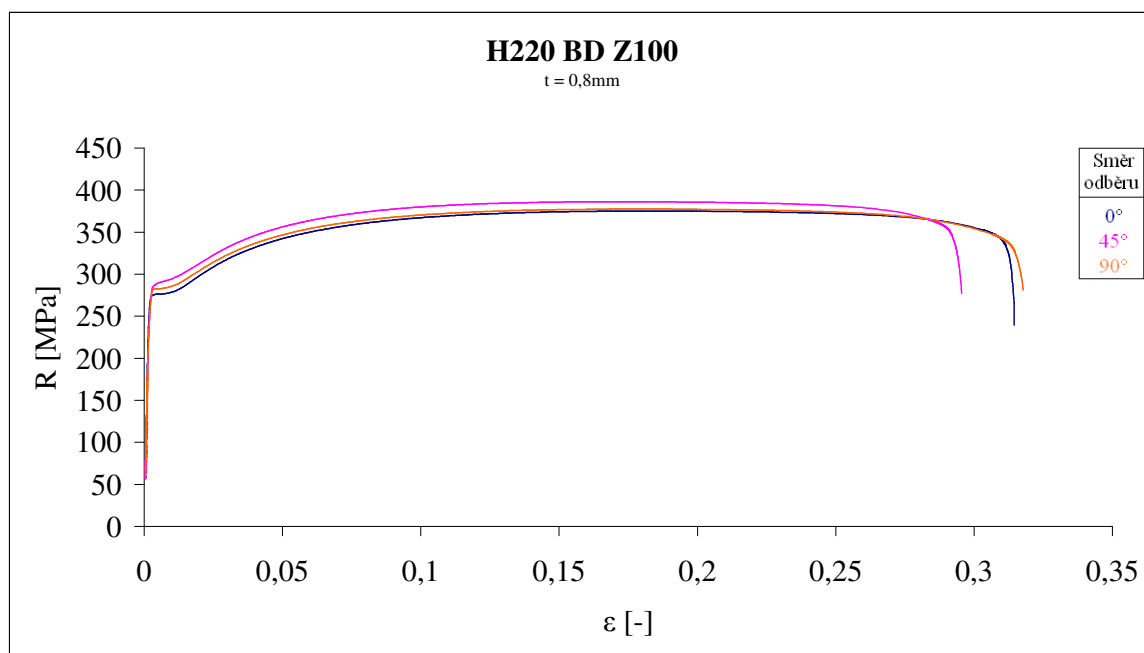
Tab. 3.2.2.5: Koeficienty monotónního zpevnění materiálu H220 BD Z100,
tloušťka 0,8 mm

H220 BD Z100							
tloušťka 0,8 mm							
	číslo vzorku	ČSN EN 10 002-1			ČSN 42 0310		
		Směr odběru			Směr odběru		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
koeficient monotónního zpevnění	1	601,94	605,12	602,87	607,51	608,92	607,23
	2	602,43	605,36	602,37	608,03	611,28	606,29
	3	602,79	608,99	602,47	607,83	615,26	606,53
	4	603,08	607,47	600,77	611,73	612,34	604,23
	5	602,97	604,22	600,22	608,76	609,43	604,49
	aritmetický průměr	602,64	606,23	601,74	608,77	611,45	605,75
	směrodatná odchylka	0,46	1,95	1,17	1,72	2,54	1,32

Tab. 3.2.2.6: Exponenty deformačního zpevnění materiálu H220 BD Z100,
tloušťka 0,8 mm

H220 BD Z100							
tloušťka 0,8 mm							
	číslo vzorku	ČSN EN 10 002-1			ČSN 42 0310		
		Směr odběru			Směr odběru		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
exponent deformačního zpevnění	1	0,1739	0,1638	0,1719	0,1794	0,1670	0,1761
	2	0,1748	0,1634	0,1708	0,1802	0,1691	0,1747
	3	0,1760	0,1650	0,1724	0,1811	0,1709	0,1764
	4	0,1779	0,1650	0,1714	0,1859	0,1698	0,1749
	5	0,1763	0,1635	0,1686	0,1818	0,1687	0,1728
	aritmetický průměr	0,1758	0,1641	0,1710	0,1817	0,1691	0,1750
	směrodatná odchylka	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$

Vliv směru válcování v závislosti $\sigma = f(\varphi)$ pro materiál H220 BD Z100 tloušťky 0,8 mm představuje obr. 3.2.2.2.



Obr. 3.2.2.2: Vliv směru válcování v závislosti $\sigma = f(\varphi)$, materiál H220 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

Pro materiál H300 BD Z100 tloušťky 0,8 mm jsou mechanické hodnoty uvedeny v tab. 3.2.2.7., velikosti koeficientů monotónního zpevnění v tab. 3.2.2.8. a exponentů deformačního zpevnění v tab. 3.2.2.9.

Tab. 3.2.2.7: Mechanické vlastnosti materiálu H300 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H300 BD Z100						
tloušťka 0,8 mm						
směr odběru	číslo vzorku	S_0 [mm ²]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80} [%]
0°	1	16,06	318,94	412,59	16,31	28,02
	2	16,06	321,94	413,14	16,41	27,18
	3	16,06	323,61	415,55	16,29	27,53
	4	16,06	328,95	415,22	16,22	26,24
	aritmetický průměr		323,36	414,13	16,31	27,24
	směrodatná odchylka		4,20	1,48	0,08	0,75

Tab. 3.2.2.7: Mechanické vlastnosti materiálu H300 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H300 BD Z100						
tloušťka 0,8 mm						
směr odběru	číslo vzorku	S_0 [mm ²]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80} [%]
45°	1	16,06	334,14	431,47	14,66	24,37
	2	16,06	338,23	432,67	14,86	23,92
	3	16,06	335,25	432,34	14,56	23,68
	4	16,06	335,37	432,24	14,84	23,93
	aritmetický průměr		335,75	432,18	14,73	23,98
	směrodatná odchylka		1,75	0,51	0,14	0,29
90°	1	15,86	331,85	420,43	15,30	26,83
	2	15,86	334,50	423,74	15,29	26,71
	3	15,86	331,20	419,84	15,37	27,14
	4	15,86	331,63	420,17	15,35	26,86
	aritmetický průměr		332,30	421,05	15,33	26,89
	směrodatná odchylka		1,49	1,81	0,04	0,18

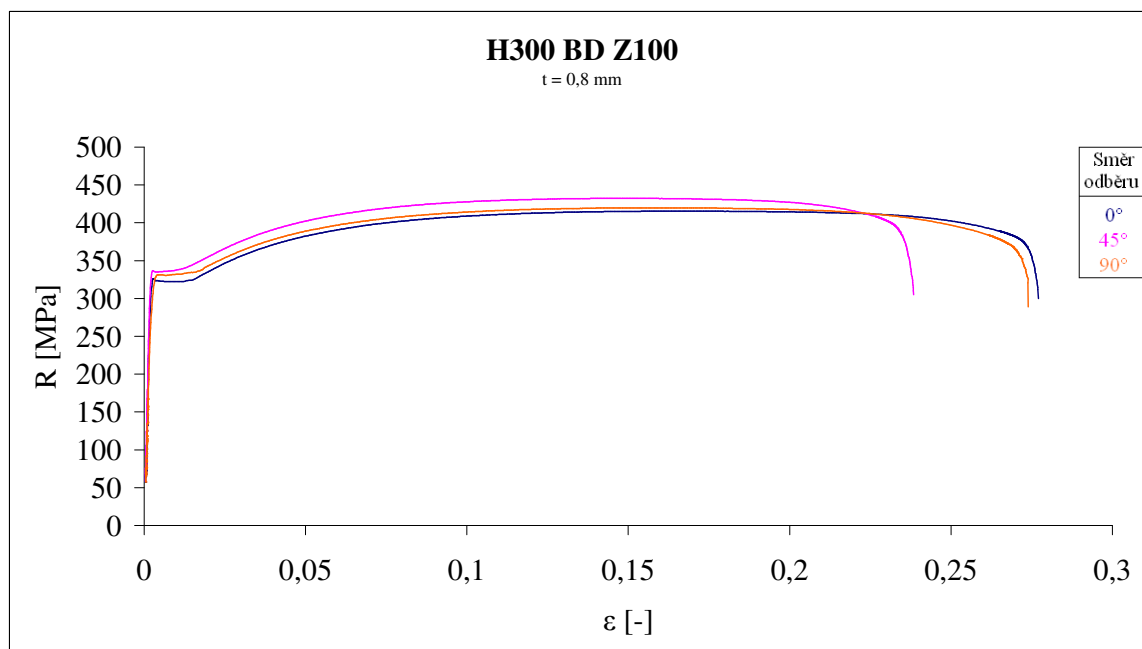
Tab. 3.2.2.8: Koeficienty monotónního zpevnění materiálu H300 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H300 BD Z100							
tloušťka 0,8 mm							
	číslo vzorku	ČSN EN 10 002-1			ČSN 42 0310		
		Směr odběru			Směr odběru		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
koeficient monotónního zpevnění	1	653,23	663,59	657,73	660,85	675,85	665,30
	2	655,41	669,35	653,37	664,00	680,83	669,50
	3	659,39	665,20	658,61	668,10	678,37	666,88
	4	656,04	666,28	655,04	668,28	679,68	668,13
	aritmetický průměr	656,02	666,11	656,19	665,31	678,68	667,45
	směrodatná odchylka	2,55	2,43	2,42	3,57	2,14	1,79

Tab. 3.2.2.9: Exponenty deformačního zpevnění materiálu H300 BD Z100,
tloušťka 0,8 mm

H300 BD Z100							
tloušťka 0,8 mm							
	číslo vzorku	ČSN EN 10 002-1			ČSN 42 0310		
		Směr odběru			Směr odběru		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
exponent deformačního zpevnění	1	0,1679	0,1513	0,1615	0,1756	0,1620	0,1689
	2	0,1691	0,1547	0,1544	0,1777	0,1648	0,1679
	3	0,1695	0,1514	0,1630	0,1778	0,1628	0,1710
	4	0,1675	0,1524	0,1563	0,1791	0,1640	0,1683
	aritmetický průměr	0,1685	0,1525	0,1588	0,1776	0,1634	0,1690
	směrodatná odchylka	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$

Vliv směru válcování v závislosti $\sigma = f(\varphi)$ pro materiál H300 BD Z100 tloušťky 0,8 mm představuje obr. 3.2.2.3.



Obr. 3.2.2.3: Vliv směru válcování v závislosti $\sigma = f(\varphi)$, materiál H300 BD Z100,
tloušťka 0,8 mm

Pro materiál H180 BD Z100 tloušťky 2 mm jsou mechanické hodnoty uvedeny v tab. 3.2.2.10., velikosti koeficientů monotónního zpevnění v tab. 3.2.2.11. a exponentů deformačního zpevnění v tab. 3.2.2.12.

Tab. 3.2.2.10: Mechanické vlastnosti materiálu H180 BD Z100, tloušťka 2 mm

H180 BD Z100						
tloušťka 2 mm						
směr odběru	číslo vzorku	S ₀	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _g [%]	A ₈₀ [%]
0°	1	17,86	216,44	318,10	22,61	42,07
	2	17,86	199,50	317,43	23,49	41,92
	3	17,86	211,77	312,54	22,84	41,88
	4	17,86	199,51	316,39	23,83	43,04
	aritmetický průměr		206,80	316,11	23,19	42,23
	směrodatná odchylka		8,64	2,49	0,56	0,55
45°	1	17,44	211,89	320,50	22,94	41,83
	2	17,44	210,97	321,90	22,92	42,07
	3	17,44	212,54	320,11	23,27	41,99
	4	17,44	213,11	320,77	23,06	41,95
	aritmetický průměr		212,13	320,82	23,05	41,96
	směrodatná odchylka		0,92	0,77	0,16	0,10
90°	1	17,76	222,08	323,89	22,00	42,06
	2	17,76	223,52	326,12	22,39	41,30
	3	17,76	223,44	321,55	21,92	37,61
	4	17,76	216,36	319,62	21,49	37,49
	aritmetický průměr		221,35	322,79	21,95	39,62
	směrodatná odchylka		3,39	2,83	0,37	2,41

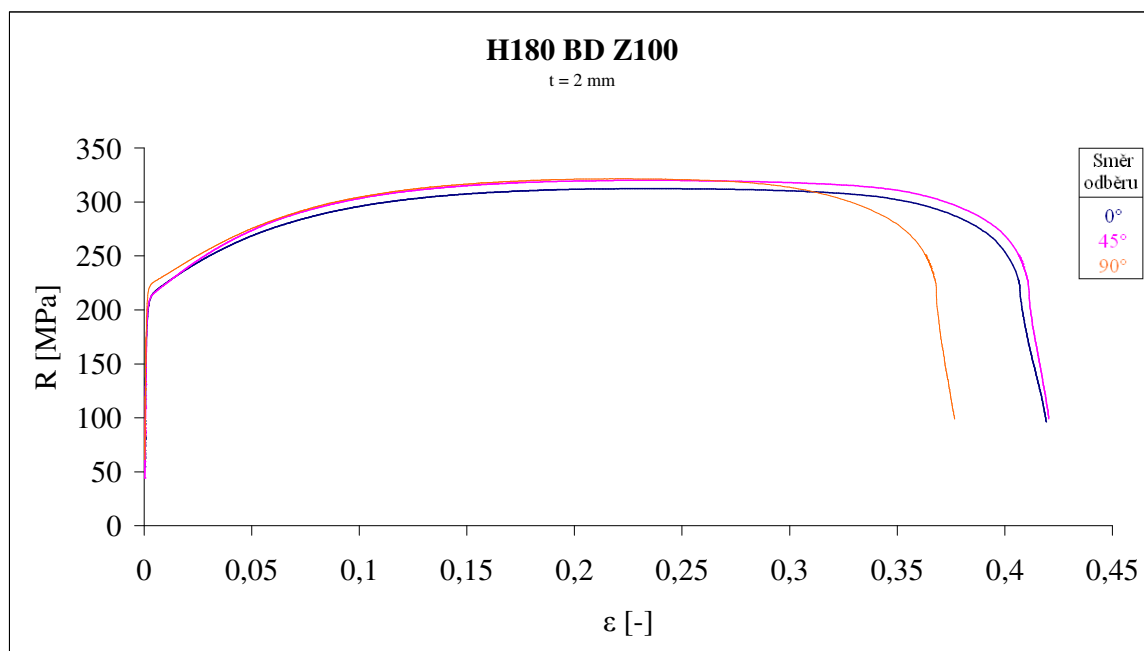
Tab. 3.2.2.11: Exponenty deformačního zpevnění materiálu H180 BD Z100,
tloušťka 2 mm

H180 BD Z100							
tloušťka 2 mm							
	číslo vzorku	ČSN EN 10 002-1			ČSN 42 0310		
		Směr odběru			Směr odběru		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
koeficient monotónního zpevnění	1	558,24	563,65	575,18	559,81	568,96	578,52
	2	564,75	566,98	580,56	569,63	571,88	584,94
	3	548,79	561,10	569,43	551,35	566,49	574,60
	4	562,71	563,29	567,71	566,99	568,64	574,67
	aritmetický průměr	558,62	563,76	573,22	561,95	568,99	578,18
	směrodatná odchylka	7,10	2,43	5,84	8,19	2,22	4,86

Tab. 3.2.2.12: Exponenty deformačního zpevnění materiálu H180 BD Z100,
tloušťka 2 mm

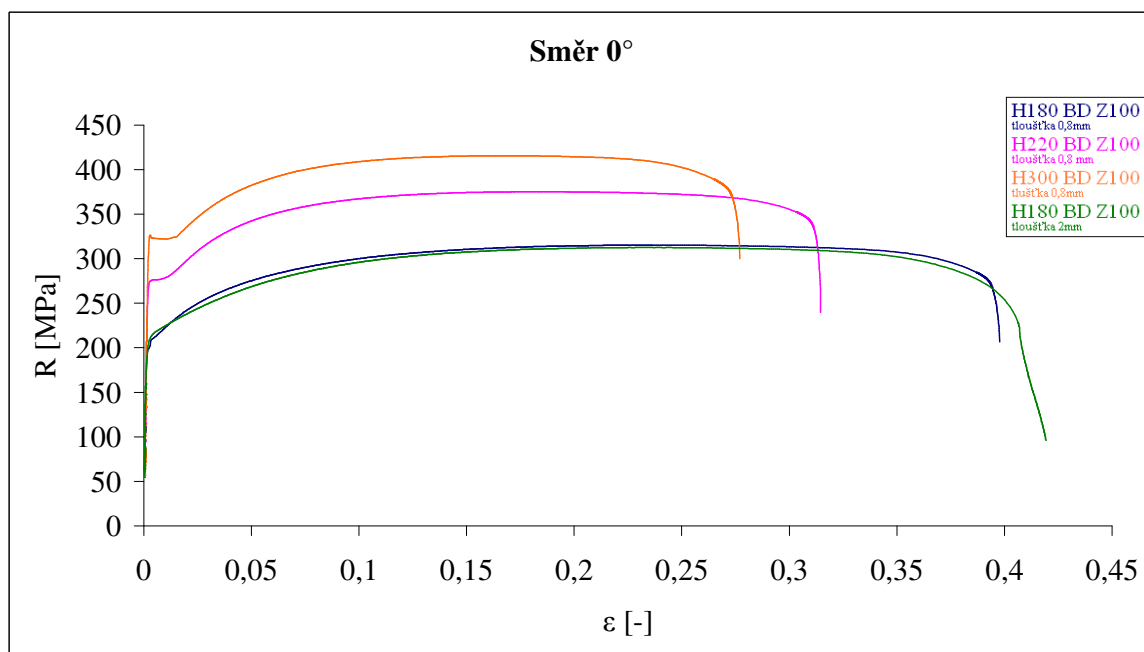
H180 BD Z100							
tloušťka 2 mm							
	číslo vzorku	ČSN EN 10 002-1			ČSN 42 0310		
		Směr odběru			Směr odběru		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
exponent deformačního zpevnění	1	0,2317	0,2321	0,2394	0,2346	0,2391	0,2445
	2	0,2391	0,2330	0,2415	0,2457	0,2397	0,2475
	3	0,2324	0,2299	0,2378	0,2362	0,2369	0,2443
	4	0,2390	0,2316	0,2384	0,2449	0,2386	0,2468
	aritmetický průměr	0,2356	0,2317	0,2393	0,2404	0,2386	0,2458
	směrodatná odchylka	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$

Vliv směru válcování v závislosti $\sigma = f(\varphi)$ pro materiál H180 BD Z100 tloušťky 2 mm představuje obr. 3.2.2.4.

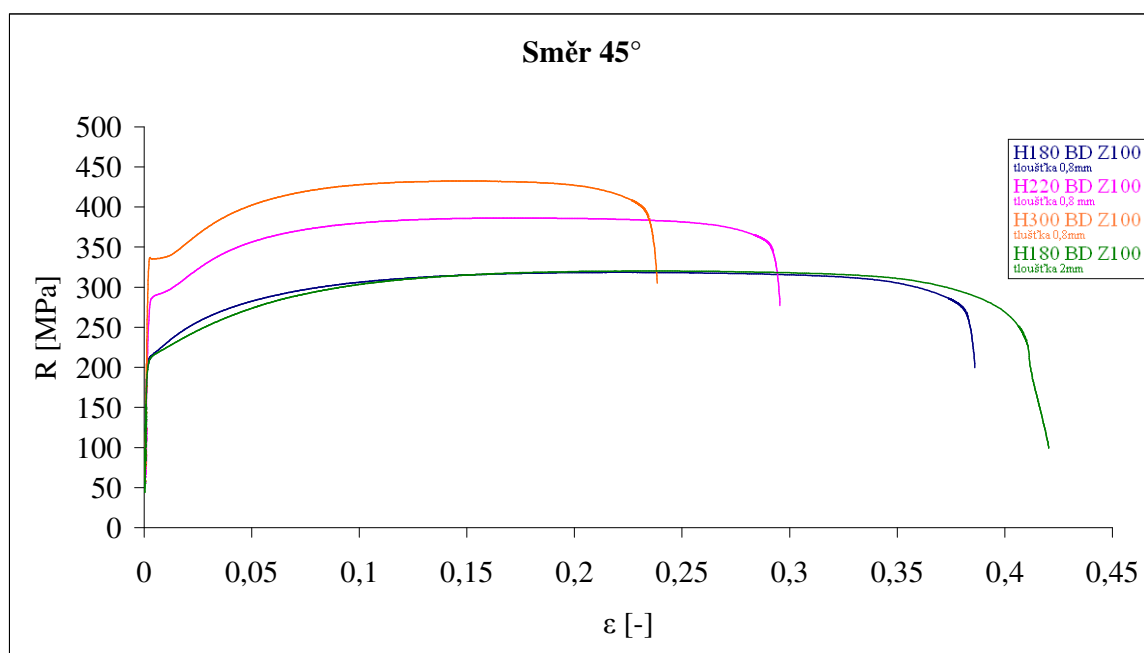
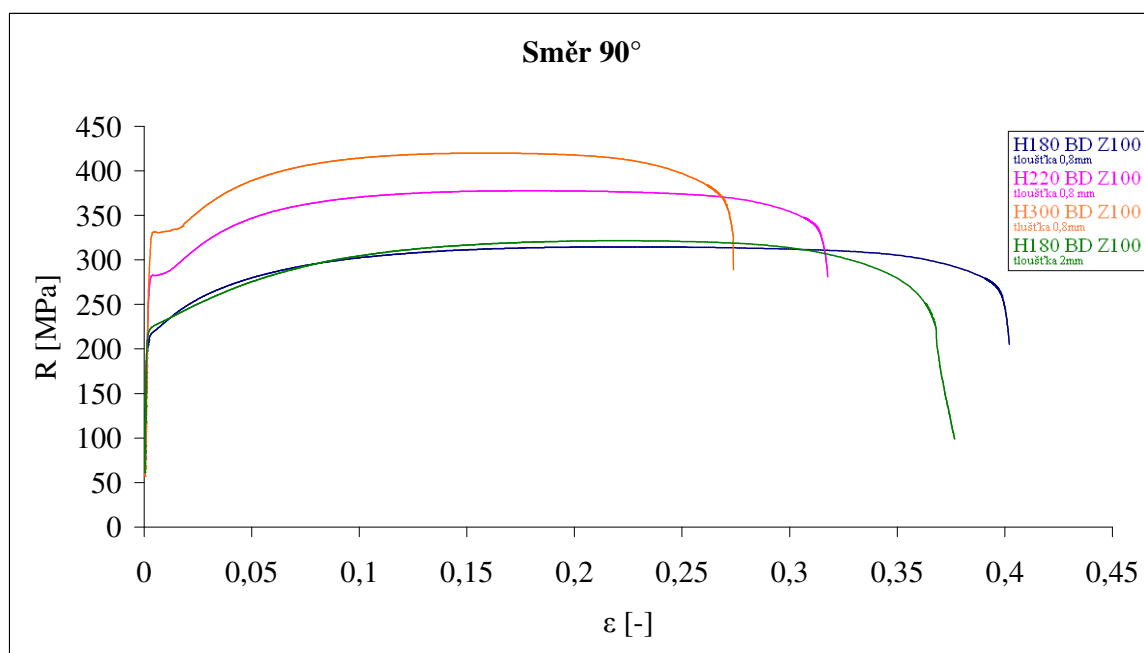


Obr. 3.2.2.4: Vliv směru válcování v závislosti $\sigma = f(\varphi)$, materiál H180 BD Z100, tloušťka 2 mm

Grafickou závislost $\sigma = f(\varphi)$ pro jednotlivé materiály představují obr. 3.2.2.5. až 3.2.2.8., pro každou závislost mají zkušební tyčky shodný směr válcování



Obr. 3.2.2.5: Porovnání materiálů v závislosti $\sigma = f(\varphi)$, směr válcování 0°

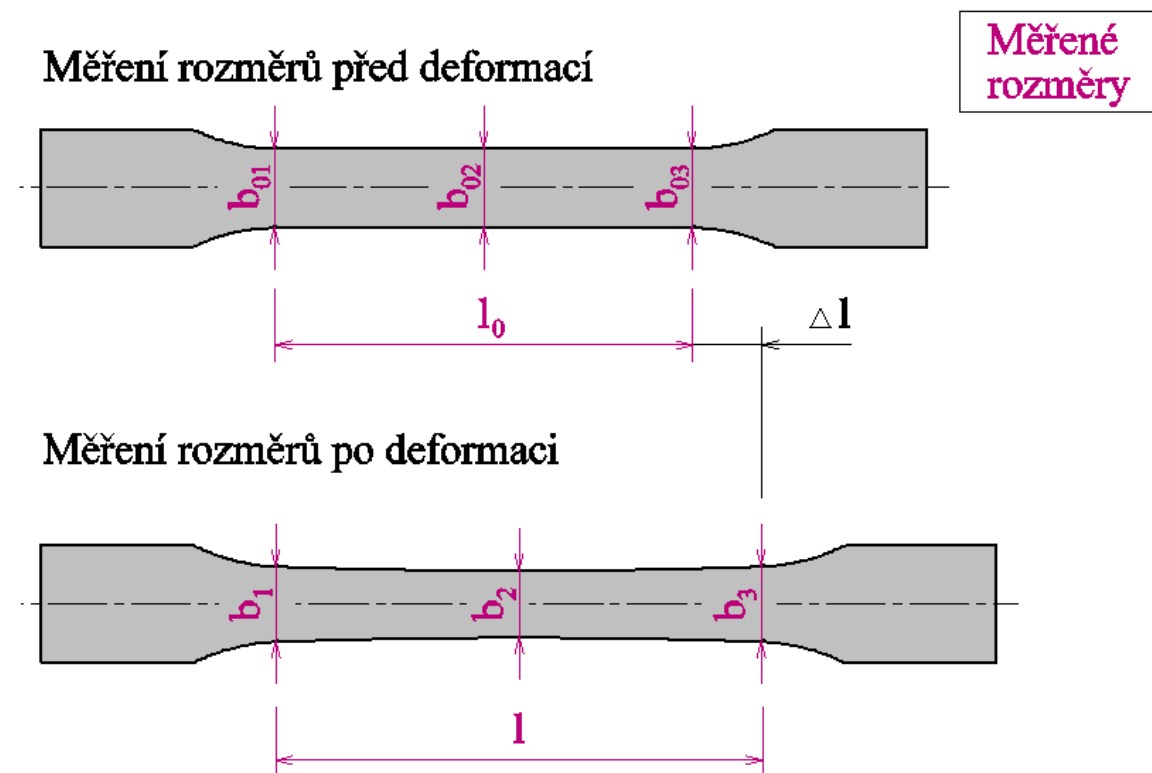
Obr. 3.2.2.6: Porovnání materiálů v závislosti $\sigma = f(\varphi)$, směr válcování 45°Obr. 3.2.2.7: Porovnání materiálů v závislosti $\sigma = f(\varphi)$, směr válcování 90°

3.3 Koeficient normálové anizotropie

3.3.1 Příprava vzorků

Pro zjištění koeficientu normálové anizotropie jsou směřodátnými hodnotami rozměry délek a šířek před a po deformaci zkušební tyčky. Šířky byly měřeny mikrometrem Mitutoyo s přesností 0,01 mm na třech místech zkušební tyčky podle obr.

3.3.1.1., pro výpočet byl uvažován vždy aritmetický průměr naměřených hodnot. Při měření délky byla zkušební tyčka nejprve orýsována na rýhovadle na přibližnou délku 80mm (obr. 3.3.1.2.). Přesné měření délky bylo provedeno na Abbého komparátoru. (obr. 3.3.1.3.)



Obr. 3.3.1.1: Schéma měření rozměrů vzorku



Obr. 3.3.1.2: Rýhovadlo



Obr. 3.3.1.3: Abbého komparátor

Deformace byla realizována na zařízení TiraTest 2300. Vzorky byly natahovány v souladu s EN 10130:1991.

3.3.2 Určení koeficientů normálové anizotropie

Výpočet koeficientu normálové anizotropie byl proveden podle vzorce:

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l_0 \cdot b_0}{l \cdot b}} \quad (3.3.2.1.)$$

Střední koeficient normálové anizotropie je aritmetickým průměrem příslušných koeficientů normálové anizotropie:

$$r_{\text{střední}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (3.3.2.2.)$$

kde n je počet vzorků ($n = 5$).

Směrově střední velikost koeficientu normálové anizotropie byla získána ze vztahu:

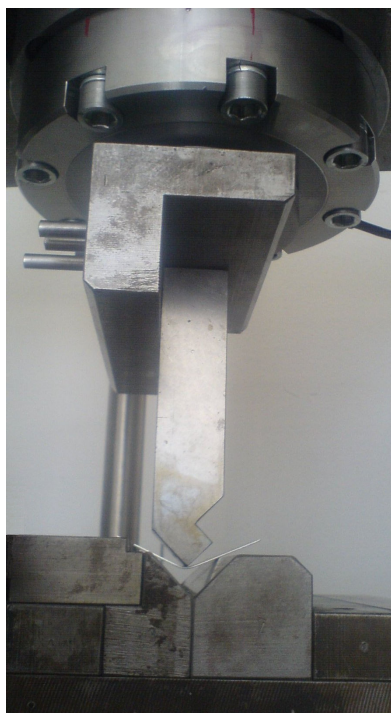
$$\bar{r} = \frac{1}{4} (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad (3.3.2.3.)$$

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze.

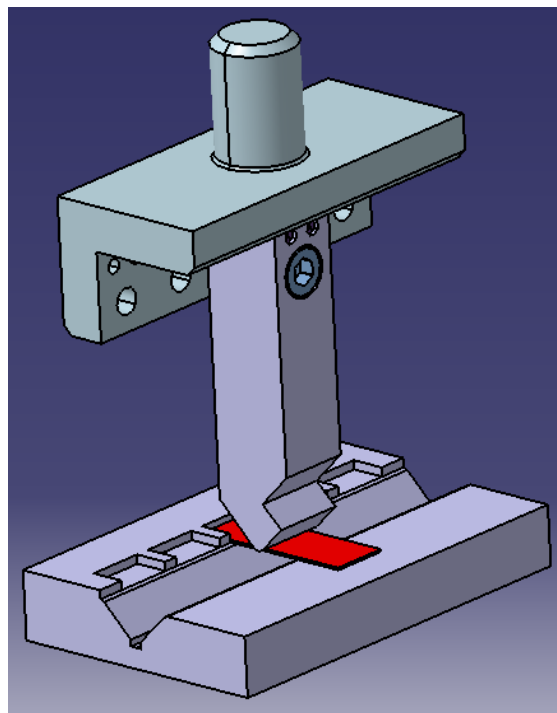
3.4 Zkouška ohybem

3.4.1 Ohýbací nástroj

Pro měření ohybu byl použit ohýbací nástroj pro ohýbání do tvaru „V“ s úhlem ohybu 90°. Ohybnice byla vyvložkována, její součástí byly pevné zakládací dorazy určené pro zakládání vzorků. Výlisky byly ohýbány v jejím středu vzhledem k vyvozeným velkým kalibračním silám. Bylo použito pěti ohybníků lišících se pouze v poloměrech zaoblení. Pro odchycení odchylek úhlů dosedacích ploch, které mají přímý vliv na velikost odpružení, byly tyto úhly přeměřeny (kap. 3.4.2.). Zobrazení ohýbacího nástroje je na obr. 3.4.1.1., obr. 3.4.1.2.



Obr. 3.4.1.1: Ohýbací nástroj

Obr. 3.4.1.2: Schéma ohýbacího nástroje
v programu CATIA V5

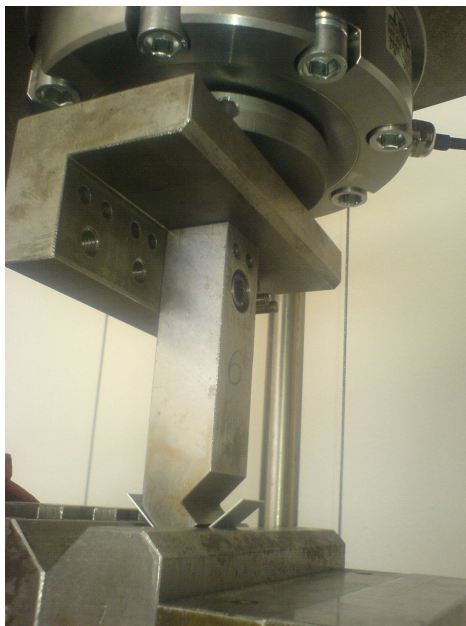
3.4.2 Měření ohybu

Měření ohybu bylo prováděno na zařízení TiraTest 2300 v laboratořích KSP TU v Liberci. (obr. 3.4.2.1.)



Obr. 3.4.2.1: TiraTest 2300

Zařízení obsahuje software na snímání dat LabTest v.3.12, který slouží k vyhodnocování výsledků, při ohýbání vzorků bylo použito definice zkoušky tlakem. Posuv příčnicku byl zajištěn pohybovým šroubem a velikost kalibrační síly byla snímána tenzometrickou snímací hlavou ve které byl upnut ohybník. (obr. 3.4.2.2.) Rychlost posuvu byla pro všechny vzorky konstantní, její velikost byla 4 mm/min. Kritériem pro ukončení ohybu bylo dosažení požadované velikosti kalibrační síly. Příklady grafických závislostí jsou součástí přílohy.



Obr. 3.4.2.2: Detail upnutí nástroje

Ohýbány byly materiály H180 BD Z100, H220 BD Z100, H300 BD Z100 tloušťky 0,8 mm a materiál H180 BD Z100 tloušťky 2 mm. Měření bylo provedeno na 5 ohybnících s poloměry ohybu 1; 2,5; 3,5; 6 a 7 mm. Všechny materiály tloušťky 0,8 mm byly ohýbány silou 500N, která dle závislosti ohybové síly na zdvihu nástroje zaručovala úplný ohyb vzorku, dále byly kalibrovány silami 2 kN, 4 kN, 6 kN a 8,5 kN. Materiál H180 BD Z100 tloušťky 2 mm byl ohýbán silou 1400 N a kalibrován stejnými silami jako ostatní vzorky. Pro každý druh materiálu určité tloušťky, ohýbací síly a poloměru ohybníku byly ohýbány 4 vzorky.

Odpružení vzorků bylo měřeno Profil-Projektorem 320 v metrologické laboratoři Katedry obrábění a montáže TU v Liberci (obr. 3.4.2.3.).



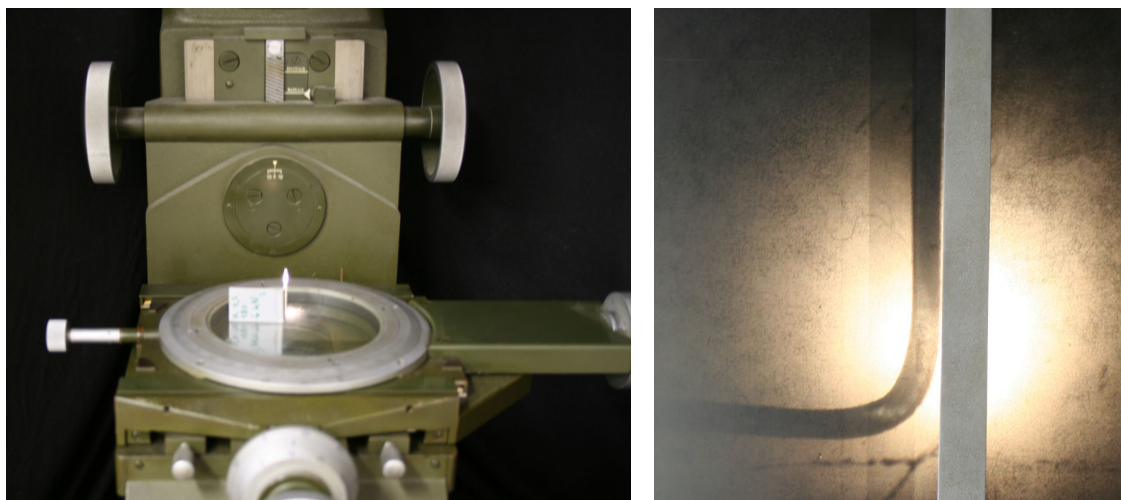
Obr. 3.4.2.3: Profil-Projektor 320

Jedná se o optické zařízení s otočným stolkem, který lze posouvat v podélném i příčném směru a otáčet. Na něm byl umístěn vzorek. Jeho obrys byl odražen na podsvícenou desku v měřítku 10:1 (obr. 3.4.2.4.).



Obr. 3.4.2.4: Obrys ohnutého vzorku při měření odpružení

Měření spočívalo ve ztotožnění obrysů obou ramen vzorku s ryskou a následným odečtením hodnoty na úhlové stupnici měřicího stolku. Odečtením obou změřených hodnot byl získán úhel ohybu vzorku po odpružení. Stejným zařízením byly změřeny i úhly dosedacích ploch ohybníků. Rozdíl úhlu ohybu vzorku a příslušného ohybníku je roven hodnotě odpružení vzorku. Aplikaci měření úhlu zachycuje obr. 3.4.2.5.



Obr. 3.4.2.5: Postup při měření úhlu

3.4.3 Statické zpracování naměřených hodnot

V grafických závislostech bylo odpružení vyhodnocováno v závislosti na kalibrační síle. Hodnoty odpružení byly měřeny přímým měřením na Profil-Projektoru 320, kde každá byla stanovena jako střední hodnota měření čtyř vzorků ohýbaných za stejných podmínek, bylo tedy možné měřenou veličinu statisticky vyhodnotit.

K tomuto vyhodnocení slouží následující statistické veličiny:

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.4.3.1.)$$

kde n je počet měření.

Směrodatná odchylka výběru:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.4.3.2.)$$

Směrodatná odchylka střední výběrové hodnoty:

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (3.4.3.3.)$$

Pomocí (3.4.3.3.) lze určit krajní chybu aritmetického průměru:

$$\bar{\kappa} = t_{n,\alpha} \cdot \bar{s} \quad (3.4.3.4.)$$

kde $t_{n,\alpha}$ je kritická hodnota Studentova rozdělení. Podle [18] je pro riziko $\alpha = 0,05$ a pro $n = 4$ velikost $t_{n,\alpha} = 3,18$.

Do výsledných grafů lze pro hodnoty odpružení vynést chybové úsečky odpovídající velikosti

$$\bar{x} = \bar{x} \pm t_{n,\alpha} \cdot \bar{s} \quad (3.4.3.5.)$$

3.4.4 Grafické znázornění výsledků

Výsledky jsou zpracovány v podobě tabulek a grafů. Jsou vyhodnoceny závislosti odpružení na poloměru ohybu a na smluvní mezi kluzu materiálů při různých kalibračních silách. Hodnoty odpružení včetně velikostí chybových úseček jsou zaznamenány v tabulkách. Dále jsou zhotoveny závislosti odpružení na kalibrační síle se změnou poloměru ohybu, materiálu a tloušťky výlisku. Doplněním je porovnání experimentálně zjištěných velikostí odpružení s teoretickým vztahem (2.1.8.3.16.).

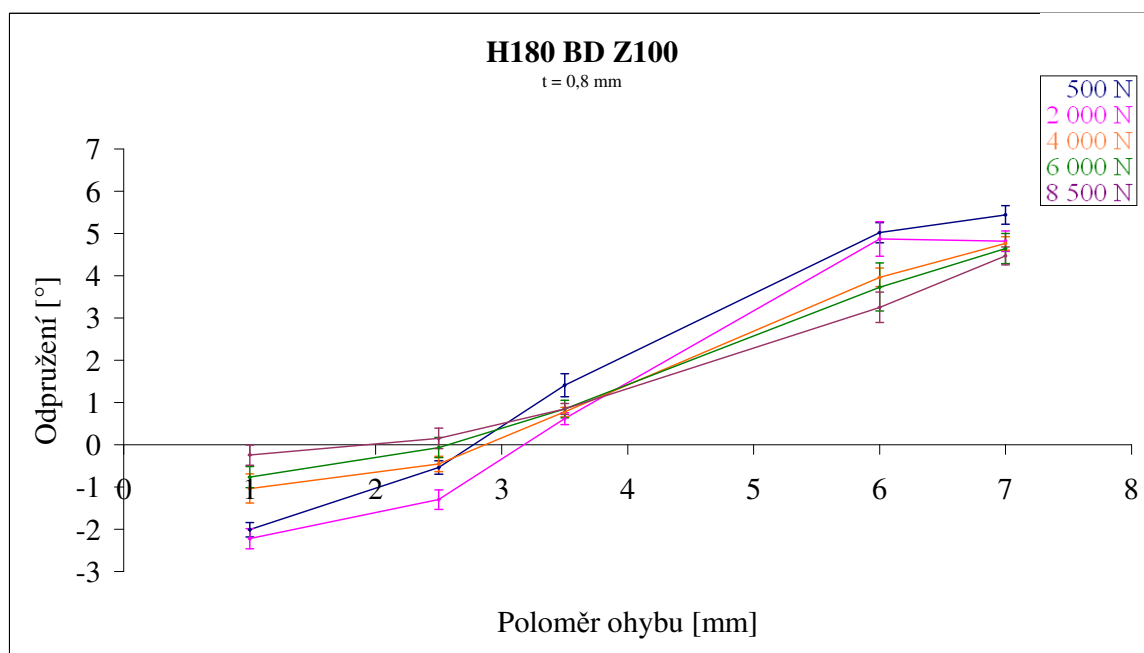
Grafické závislosti odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách pro jednotlivé materiály jsou na obr. 3.4.4.1. až 3.4.4.4. Velikosti odpružení včetně chybových úseček jsou v tab. 3.4.4.1. až 3.4.4.4.

Tab. 3.4.4.1: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H180 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H180 BD Z100					
tloušťka 0,8 mm					
poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
1	500	-2°01' ± 0°10'	6	500	5°01' ± 0°14'
	2000	-2°13' ± 0°14'		2000	4°53' ± 0°24'
	4000	-1°02' ± 0°20'		4000	3°58' ± 0°13'
	6000	-0°45' ± 0°15'		6000	3°44' ± 0°34'
	8500	-0°15' ± 0°15'		8500	3°15' ± 0°21'

Tab. 3.4.4.1: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H180 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

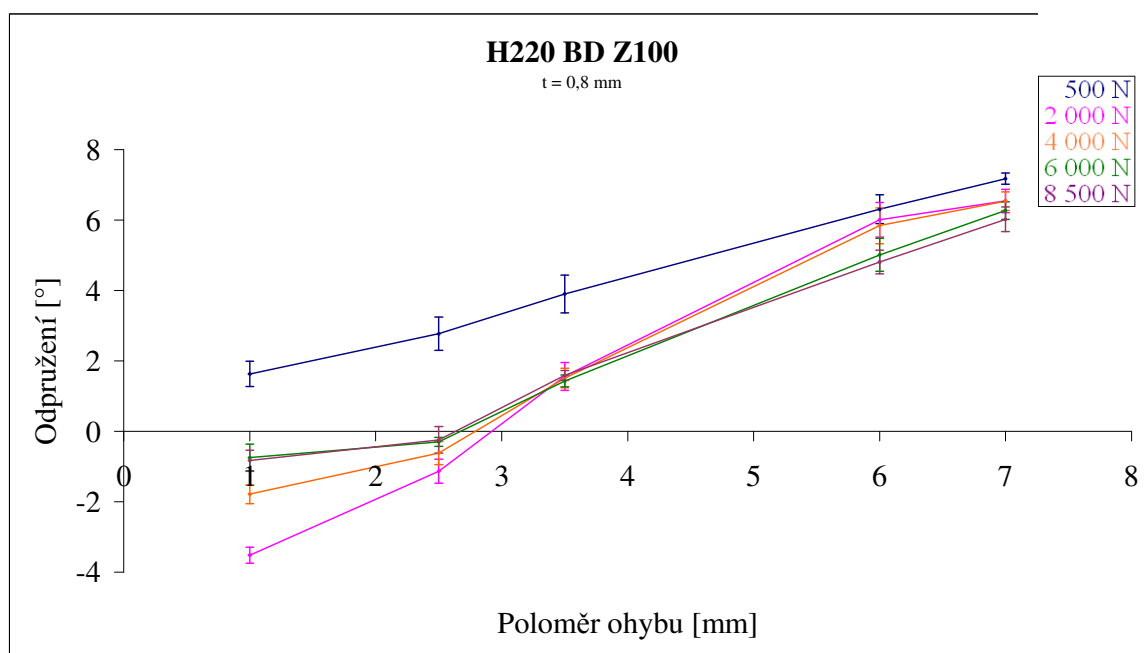
H180 BD Z100					
tloušťka 0,8 mm					
poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
2,5	500	$-0^{\circ}32' \pm 0^{\circ}10'$	7	500	$5^{\circ}27' \pm 0^{\circ}13'$
	2000	$-1^{\circ}18' \pm 0^{\circ}14'$		2000	$4^{\circ}49' \pm 0^{\circ}14'$
	4000	$-0^{\circ}27' \pm 0^{\circ}11'$		4000	$4^{\circ}46' \pm 0^{\circ}09'$
	6000	$-0^{\circ}04' \pm 0^{\circ}15'$		6000	$4^{\circ}39' \pm 0^{\circ}22'$
	8500	$0^{\circ}09' \pm 0^{\circ}14'$		8500	$4^{\circ}28' \pm 0^{\circ}12'$
3,5	500	$1^{\circ}25' \pm 0^{\circ}16'$			
	2000	$0^{\circ}37' \pm 0^{\circ}08'$			
	4000	$0^{\circ}47' \pm 0^{\circ}07'$			
	6000	$0^{\circ}51' \pm 0^{\circ}13'$			
	8500	$0^{\circ}51' \pm 0^{\circ}08'$			



Obr. 3.4.4.1: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H180 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

Tab. 3.4.4.2: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H220 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H220 BD Z100					
tloušťka 0,8 mm					
poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
1	500	1°38' ± 0°22'	6	500	6°19' ± 0°25'
	2000	-3°31' ± 0°14'		2000	6°01' ± 0°30'
	4000	-1°47' ± 0°16'		4000	5°51' ± 0°31'
	6000	-0°45' ± 0°23'		6000	5°01' ± 0°28'
	8500	-0°50' ± 0°18'		8500	4°49' ± 0°21'
2,5	500	2°47' ± 0°28'	7	500	7°11' ± 0°09'
	2000	-1°08' ± 0°20'		2000	6°33' ± 0°20'
	4000	-0°37' ± 0°20'		4000	6°32' ± 0°16'
	6000	-0°18' ± 0°08'		6000	6°16' ± 0°15'
	8500	-0°15' ± 0°23'		8500	6°02' ± 0°21'
3,5	500	3°54' ± 0°32'			
	2000	1°34' ± 0°23'			
	4000	1°31' ± 0°17'			
	6000	1°26' ± 0°10'			
	8500	1°35' ± 0°08'			



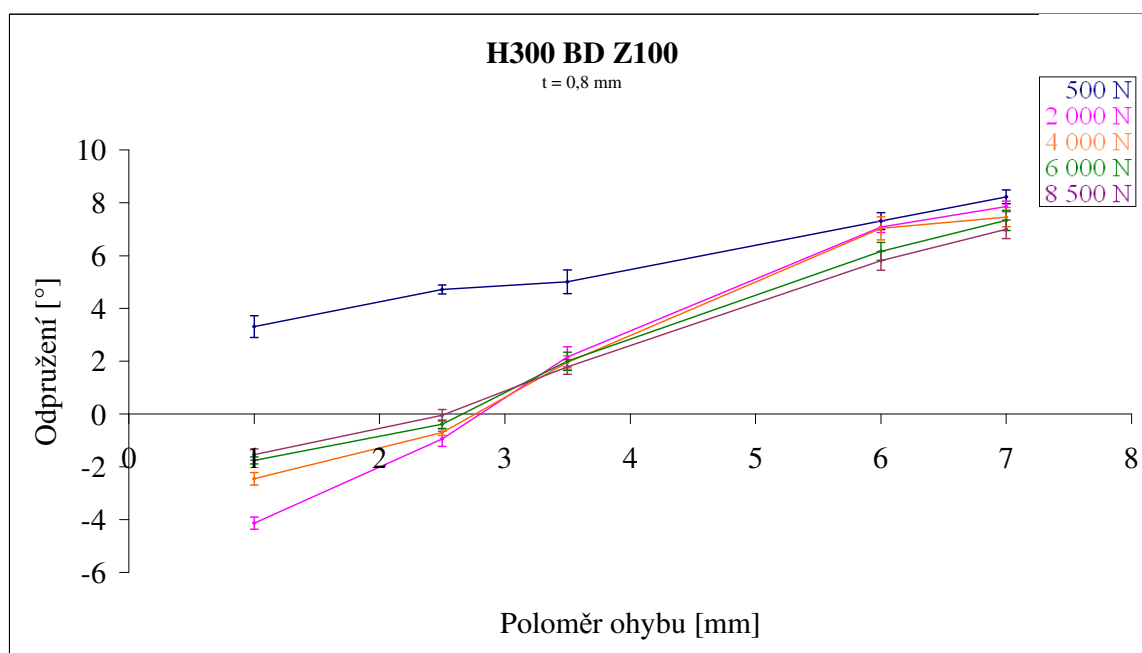
Obr. 3.4.4.2: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H220 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

Tab. 3.4.4.3: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H300 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

H300 BD Z100					
tloušťka 0,8 mm					
poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
1	500	3°19' ± 0°25'	6	500	7°19' ± 0°19'
	2000	-4°08' ± 0°14'		2000	7°05' ± 0°13'
	4000	-2°27' ± 0°14'		4000	7°02' ± 0°26'
	6000	-1°46' ± 0°08'		6000	6°10' ± 0°20'
	8500	-1°32' ± 0°12'		8500	5°48' ± 0°22'
2,5	500	4°43' ± 0°10'	7	500	8°14' ± 0°16'
	2000	-0°56' ± 0°17'		2000	7°52' ± 0°12'
	4000	-0°42' ± 0°07'		4000	7°28' ± 0°22'
	6000	-0°23' ± 0°10'		6000	7°20' ± 0°23'
	8500	-0°03' ± 0°13'		8500	7°00' ± 0°21'

Tab. 3.4.4.3: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H300 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

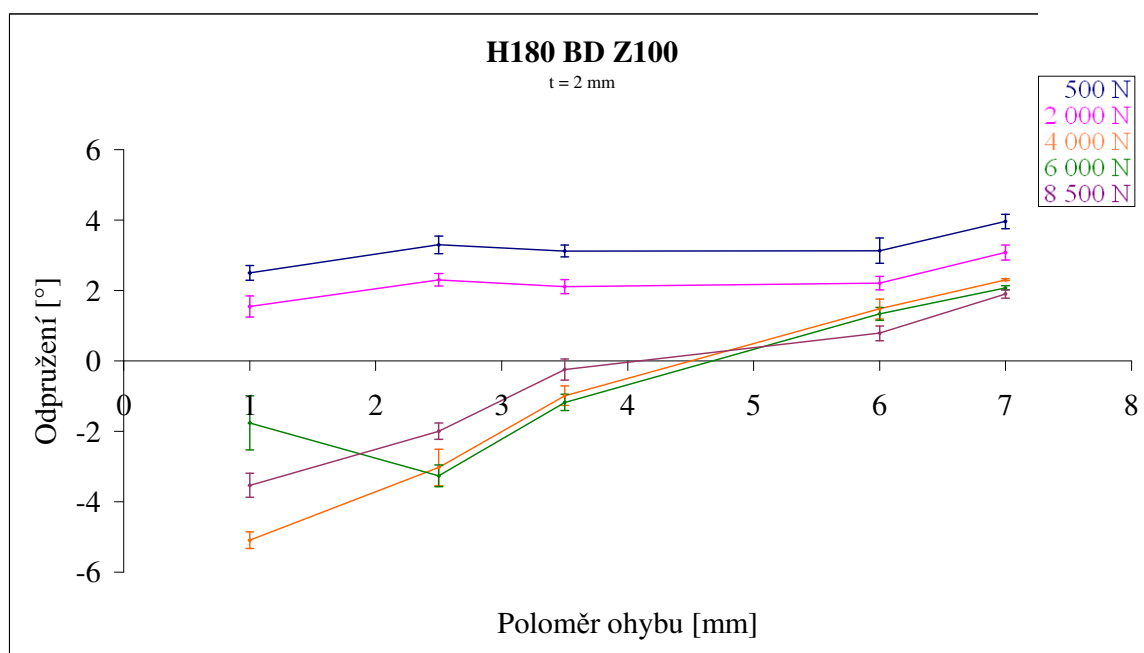
H300 BD Z100					
tloušťka 0,8 mm					
poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
3,5	500	5°00' ± 0°27'			
	2000	2°10' ± 0°23'			
	4000	1°57' ± 0°15'			
	6000	2°00' ± 0°21'			
	8500	1°47' ± 0°17'			



Obr. 3.4.4.3: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H300 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

Tab. 3.4.4.4: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách,
H180 BD Z100, tloušťka 2 mm

H180 BD Z100					
tloušťka 2,0 mm					
poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	poloměr ohybu [mm]	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
1	1400	2°30' ± 0°13'	6	1400	3°08' ± 0°12'
	2000	1°33' ± 0°18'		2000	2°13' ± 0°11'
	4000	-5°06' ± 0°15'		4000	1°29' ± 0°17'
	6000	-5°11' ± 0°46'		6000	1°20' ± 0°11'
	8500	-3°32' ± 0°20'		8500	0°47' ± 0°13'
2,5	1400	3°18' ± 0°15'	7	1400	3°58' ± 0°12'
	2000	2°19' ± 0°11'		2000	3°05' ± 0°12'
	4000	-3°02' ± 0°31'		4000	2°19' ± 0°02'
	6000	-3°16' ± 0°19'		6000	2°05' ± 0°04'
	8500	-2°00' ± 0°14'		8500	1°54' ± 0°07'
3,5	1400	3°07' ± 0°10'			
	2000	2°07' ± 0°12'			
	4000	-1°59' ± 0°17'			
	6000	-0°11' ± 0°14'			
	8500	-1°15' ± 0°18'			



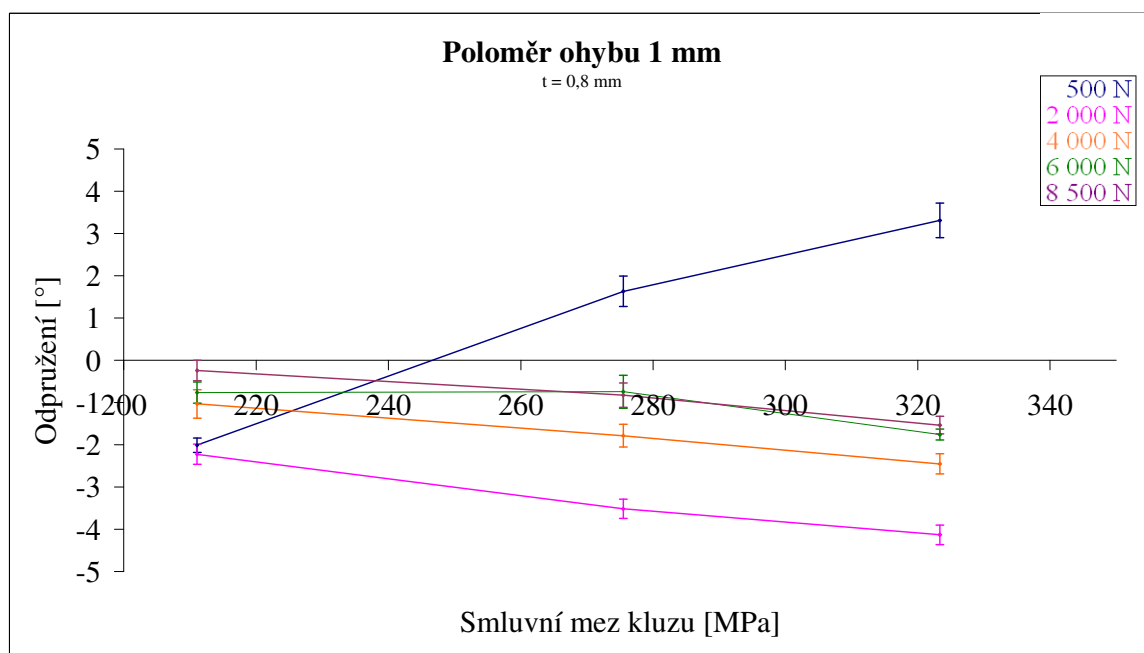
Obr. 3.4.4.4: Závislost odpružení na poloměru ohybu při různých kalibračních silách, H180 BD Z100, tloušťka 2 mm

Grafické závislosti odpružení na smluvní mezi kluzu při různých kalibračních silách pro dané poloměry ohybu jsou na obr. 3.4.4.5. až 3.4.4.9. Hodnoty smluvní meze kluzu odpovídají materiálům H180 BD Z100, H220 BD Z100 a H300 BD Z100 tloušťky 0,8 mm. Byly zjištěny ze statické zkoušky tahem jako průměrná hodnota zkoušených vzorků s orientací 0° ke směru válcování.

Velikosti odpružení včetně chybových úseček jsou pro tyto závislosti zaznamenány v tab. 3.4.4.5. až 3.4.4.9.

Tab. 3.4.4.5: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 1 mm, tloušťka 0,8 mm

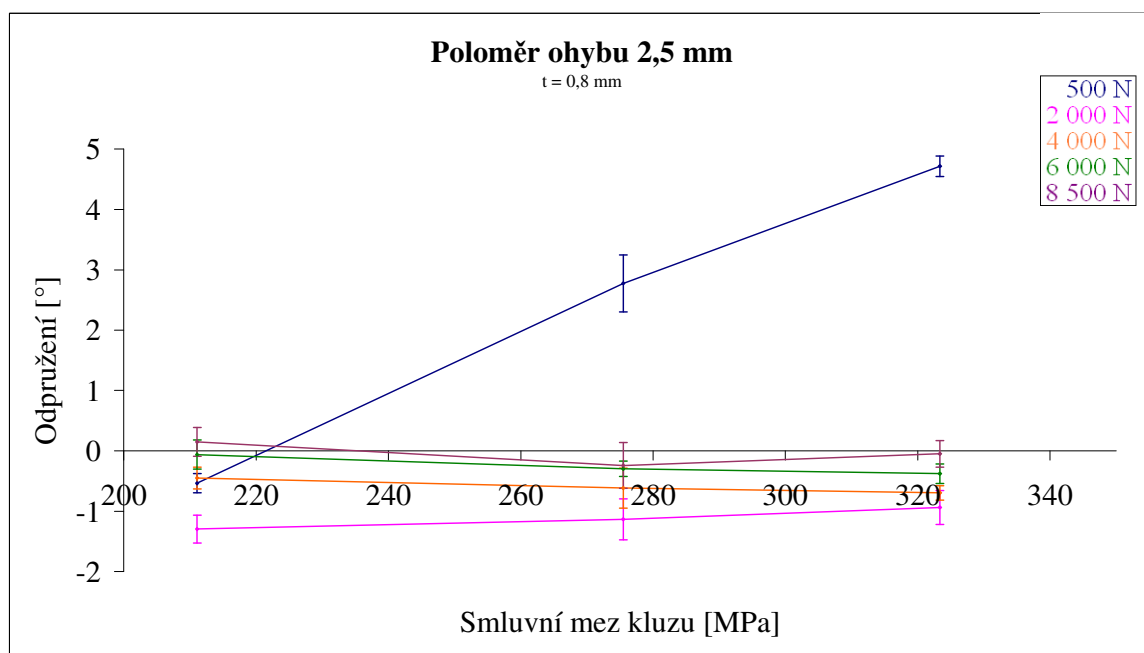
Poloměr ohybu 1 mm					
tloušťka 0,8 mm					
materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
H180 BD Z100	500	$-2^{\circ}01' \pm 0^{\circ}10'$	H300 BD Z100	500	$3^{\circ}19' \pm 0^{\circ}25'$
	2000	$-2^{\circ}13' \pm 0^{\circ}14'$		2000	$-4^{\circ}08' \pm 0^{\circ}14'$
	4000	$-1^{\circ}02' \pm 0^{\circ}20'$		4000	$-2^{\circ}27' \pm 0^{\circ}14'$
	6000	$-0^{\circ}45' \pm 0^{\circ}15'$		6000	$-1^{\circ}46' \pm 0^{\circ}08'$
	8500	$-0^{\circ}15' \pm 0^{\circ}15'$		8500	$-1^{\circ}32' \pm 0^{\circ}12'$
H220 BD Z100	500	$1^{\circ}38' \pm 0^{\circ}22'$			
	2000	$-3^{\circ}31' \pm 0^{\circ}14'$			
	4000	$-1^{\circ}47' \pm 0^{\circ}16'$			
	6000	$-0^{\circ}45' \pm 0^{\circ}23'$			
	8500	$-0^{\circ}50' \pm 0^{\circ}18'$			



Obr. 3.4.4.5: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 1 mm, tloušťka 0,8 mm

Tab. 3.4.4.6: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 2,5 mm, tloušťka 0,8 mm

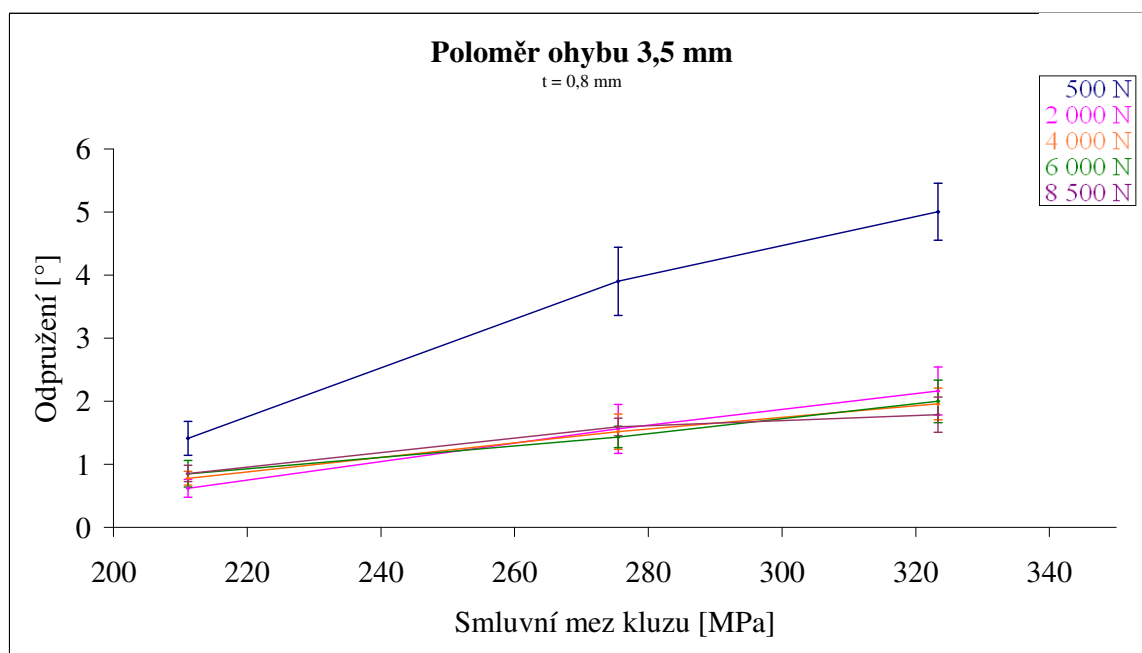
Poloměr ohybu 2,5 mm					
tloušťka 0,8 mm					
materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
H180 BD Z100	500	$-0^{\circ}32' \pm 0^{\circ}10'$	H300 BD Z100	500	$4^{\circ}43' \pm 0^{\circ}10'$
	2000	$-1^{\circ}18' \pm 0^{\circ}14'$		2000	$-0^{\circ}56' \pm 0^{\circ}17'$
	4000	$-0^{\circ}27' \pm 0^{\circ}11'$		4000	$-0^{\circ}42' \pm 0^{\circ}07'$
	6000	$-0^{\circ}04' \pm 0^{\circ}15'$		6000	$-0^{\circ}23' \pm 0^{\circ}10'$
	8500	$0^{\circ}09' \pm 0^{\circ}14'$		8500	$-0^{\circ}03' \pm 0^{\circ}13'$
H220 BD Z100	500	$2^{\circ}47' \pm 0^{\circ}28'$			
	2000	$-1^{\circ}08' \pm 0^{\circ}20'$			
	4000	$-0^{\circ}37' \pm 0^{\circ}20'$			
	6000	$-0^{\circ}18' \pm 0^{\circ}08'$			
	8500	$-0^{\circ}15' \pm 0^{\circ}23'$			



Obr. 3.4.4.6: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 2,5 mm, tloušťka 0,8 mm

Tab. 3.4.4.7: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 3,5 mm, tloušťka 0,8 mm

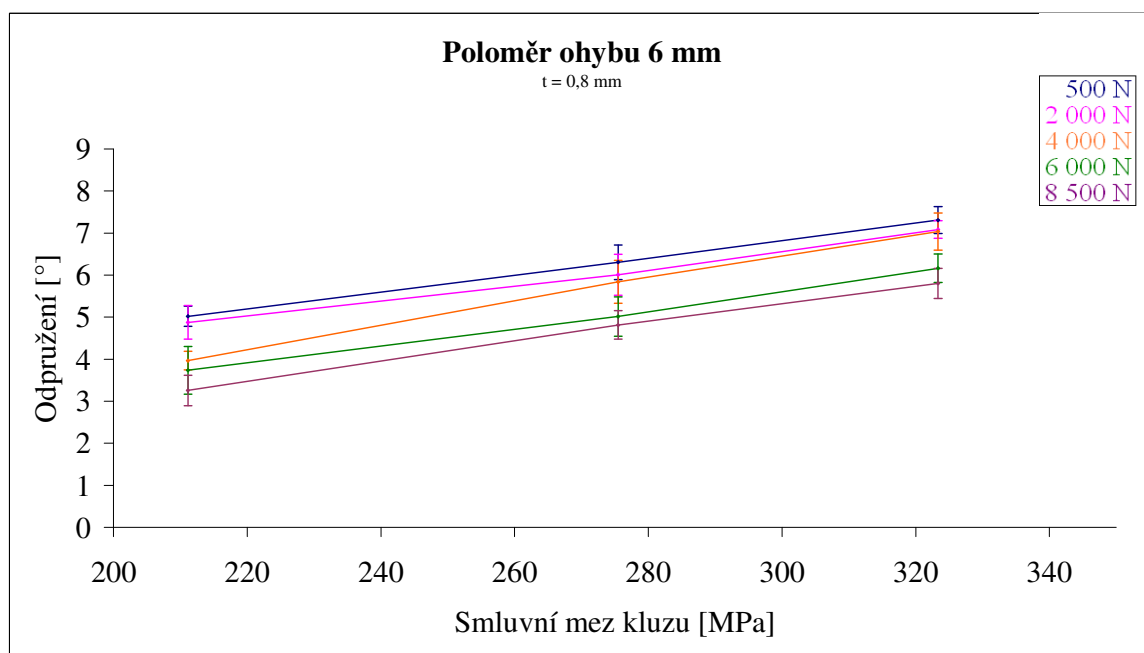
Poloměr ohybu 3,5 mm					
tloušťka 0,8 mm					
materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
H180 BD Z100	500	1°25' ± 0°16'	H300 BD Z100	500	5°00' ± 0°27'
	2000	0°37' ± 0°08'		2000	2°10' ± 0°23'
	4000	0°47' ± 0°07'		4000	1°57' ± 0°15'
	6000	0°51' ± 0°13'		6000	2°00' ± 0°21'
	8500	0°51' ± 0°08'		8500	1°47' ± 0°17'
H220 BD Z100	500	3°54' ± 0°32'			
	2000	1°34' ± 0°23'			
	4000	1°31' ± 0°17'			
	6000	1°26' ± 0°10'			
	8500	1°35' ± 0°08'			



Obr. 3.4.4.7: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 3,5 mm, tloušťka 0,8 mm

Tab. 3.4.4.8: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 6 mm, tloušťka 0,8 mm

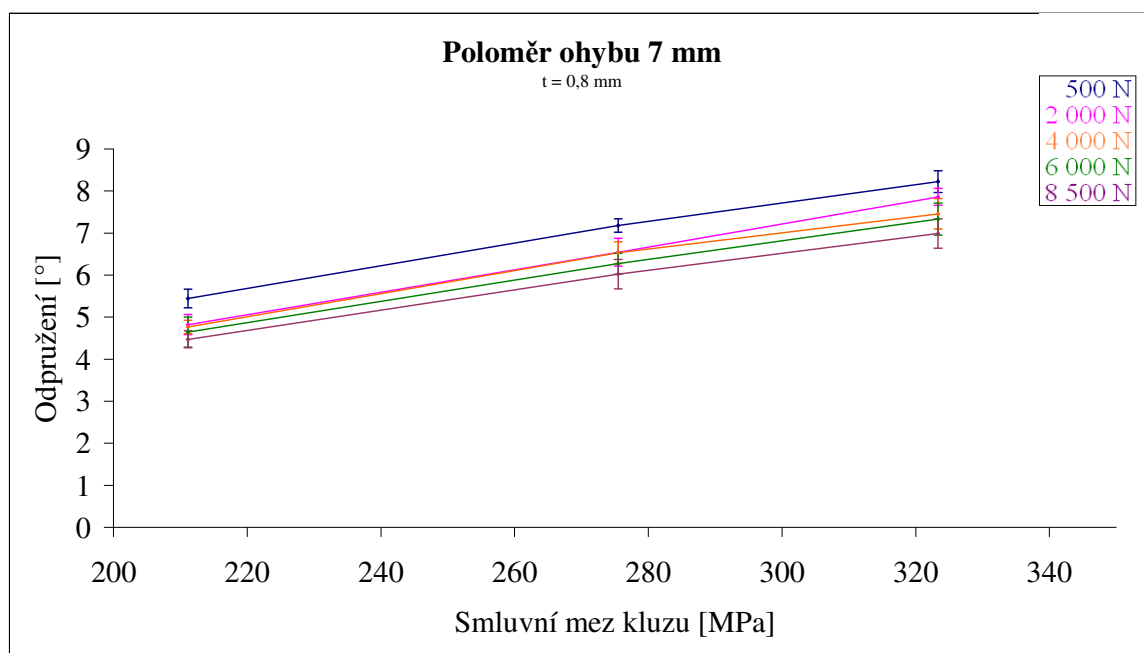
Poloměr ohybu 6 mm					
tloušťka 0,8 mm					
materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
H180 BD Z100	500	5°01' ± 0°14'	H300 BD Z100	500	7°19' ± 0°19'
	2000	4°53' ± 0°24'		2000	7°05' ± 0°13'
	4000	3°58' ± 0°13'		4000	7°02' ± 0°26'
	6000	3°44' ± 0°34'		6000	6°10' ± 0°20'
	8500	3°15' ± 0°21'		8500	5°48' ± 0°22'
H220 BD Z100	500	6°19' ± 0°25'			
	2000	6°01' ± 0°30'			
	4000	5°51' ± 0°31'			
	6000	5°01' ± 0°28'			
	8500	4°49' ± 0°21'			



Obr. 3.4.4.8: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 6 mm, tloušťka 0,8 mm

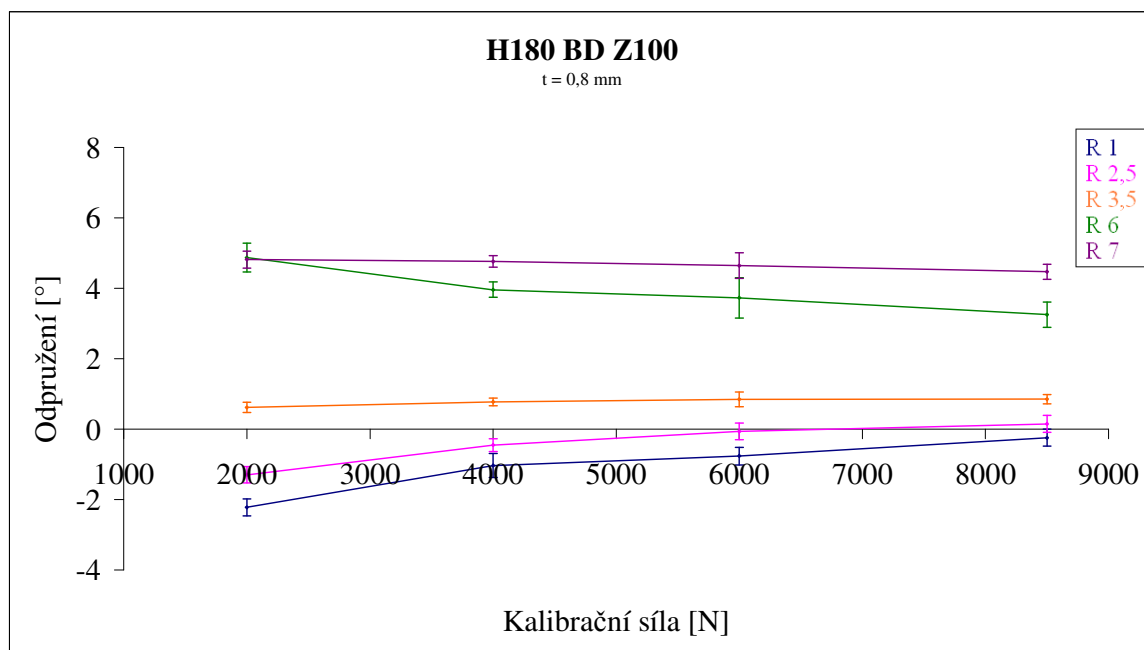
Tab. 3.4.4.9: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 7 mm, tloušťka 0,8 mm

Poloměr ohybu 7 mm					
tloušťka 0,8 mm					
materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]	materiál	ohýbací síla [N]	odpružení ± tol.interval [°]
H180 BD Z100	500	5°27' ± 0°13'	H300 BD Z100	500	8°14' ± 0°16'
	2000	4°49' ± 0°14'		2000	7°52' ± 0°12'
	4000	4°46' ± 0°09'		4000	7°28' ± 0°22'
	6000	4°39' ± 0°22'		6000	7°20' ± 0°23'
	8500	4°28' ± 0°12'		8500	7°00' ± 0°21'
H220 BD Z100	500	7°11' ± 0°09'			
	2000	6°33' ± 0°20'			
	4000	6°32' ± 0°16'			
	6000	6°16' ± 0°15'			
	8500	6°02' ± 0°21'			

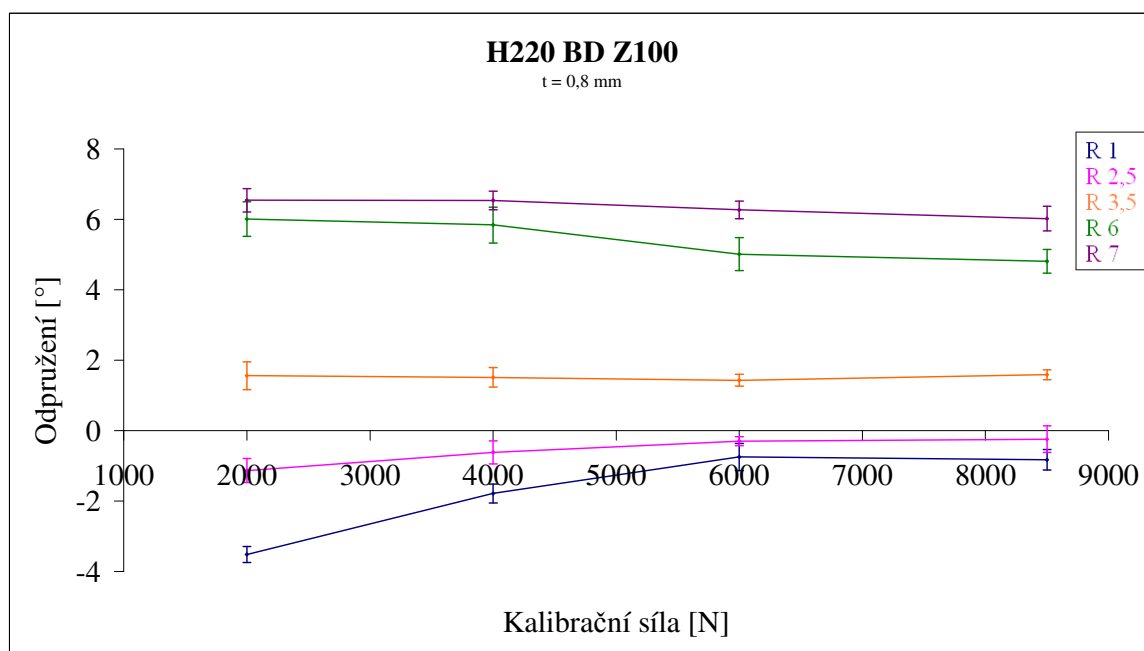


Obr. 3.4.4.9: Závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé kalibrační síly,
poloměr ohybu 7 mm, tloušťka 0,8 mm

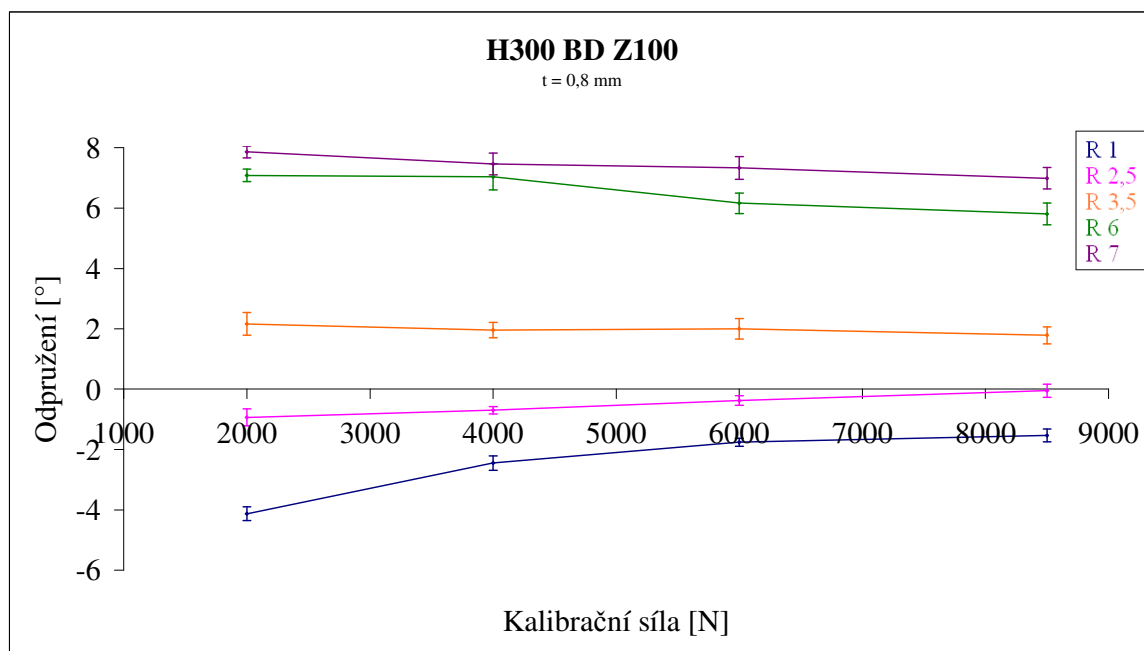
Závislosti odpružení na kalibrační síle se změnou poloměru ohybu jsou pro jednotlivé materiály zpracovány graficky na obr. 3.4.4.10. až 3.4.4.13. V těchto grafech není zaznamenáno odpružení při volném ohybu, jedná se pouze o odpružení při kalibraci.



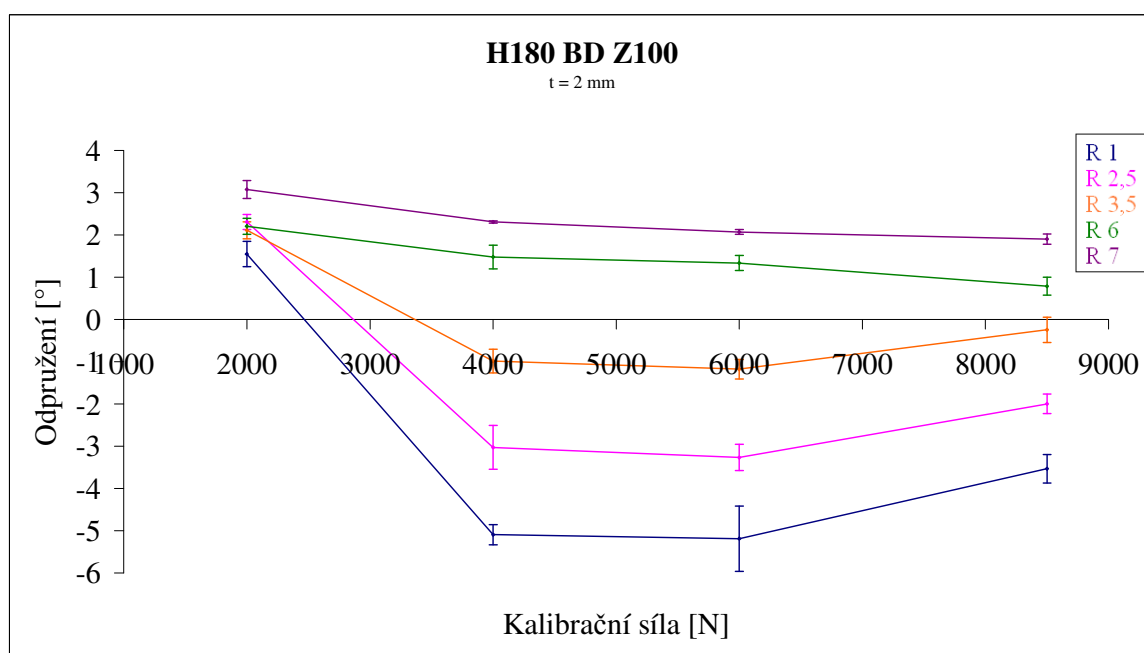
Obr. 3.4.4.10: Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé poloměry ohybu, H180 BD Z100, tloušťka 0,8 mm



Obr. 3.4.4.11: Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé poloměry ohybu, H220 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

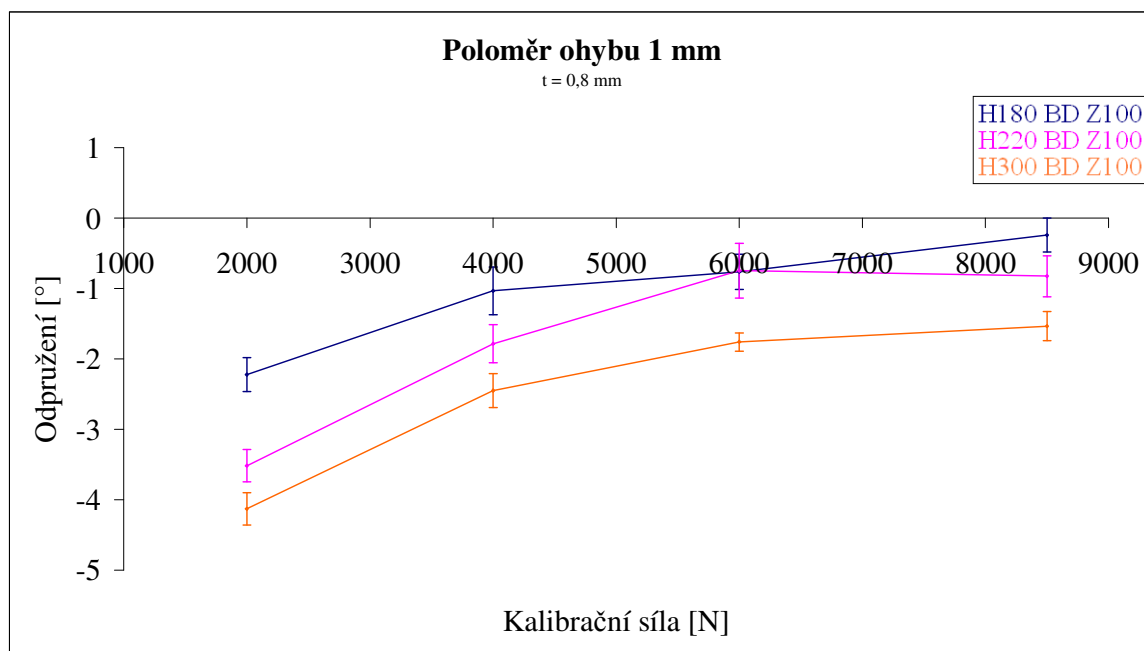


Obr. 3.4.4.12: Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé poloměry ohybu, H300 BD Z100, tloušťka 0,8 mm

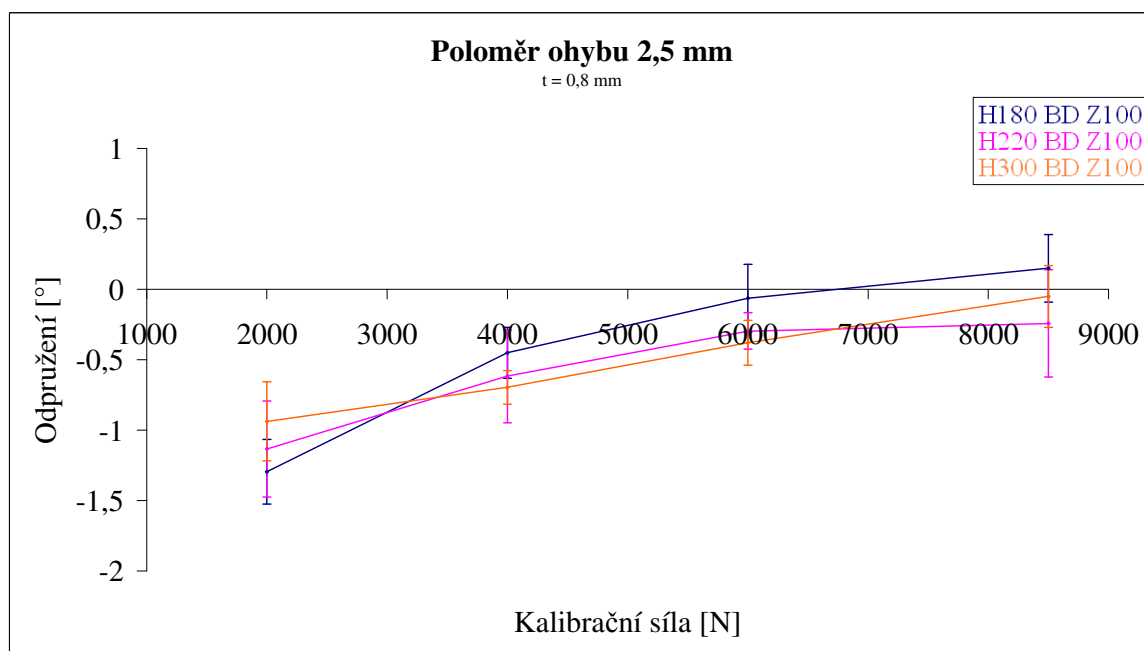


Obr. 3.4.4.13: Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé poloměry ohybu, H180 BD Z100, tloušťka 2 mm

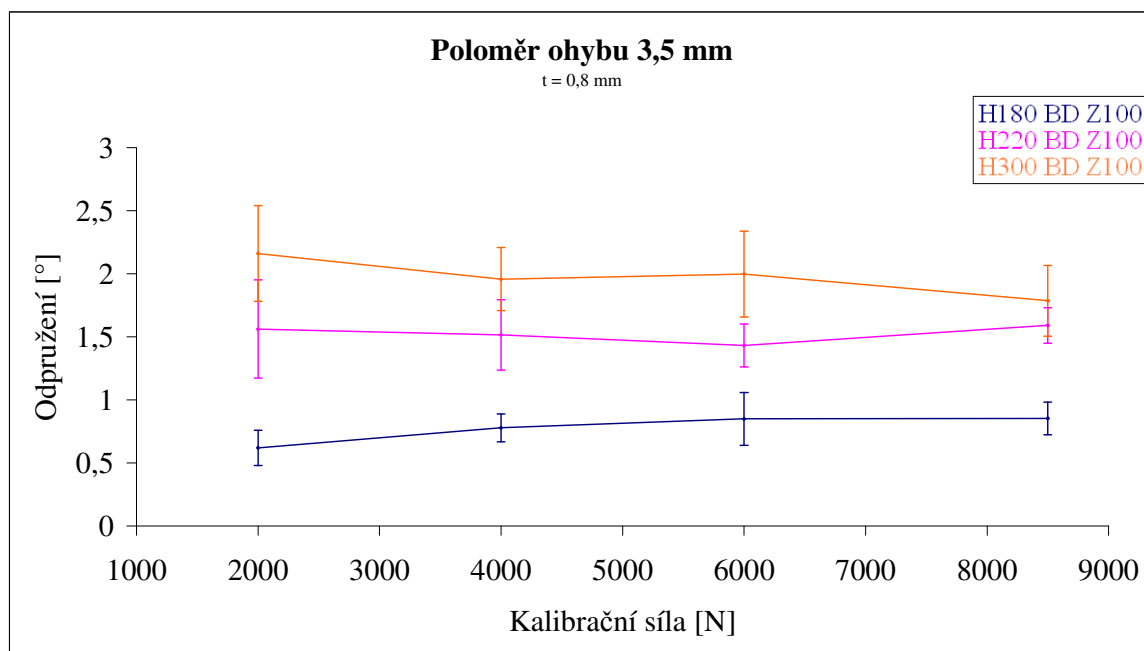
Grafické závislosti odpružení na kalibrační síle se změnou materiálů jsou pro jednotlivé poloměry ohybu zpracovány na obr. 3.4.4.14. až 3.2.4.18. V těchto grafech není zaznamenáno odpružení při volném ohybu, jedná se pouze o odpružení při kalibraci.



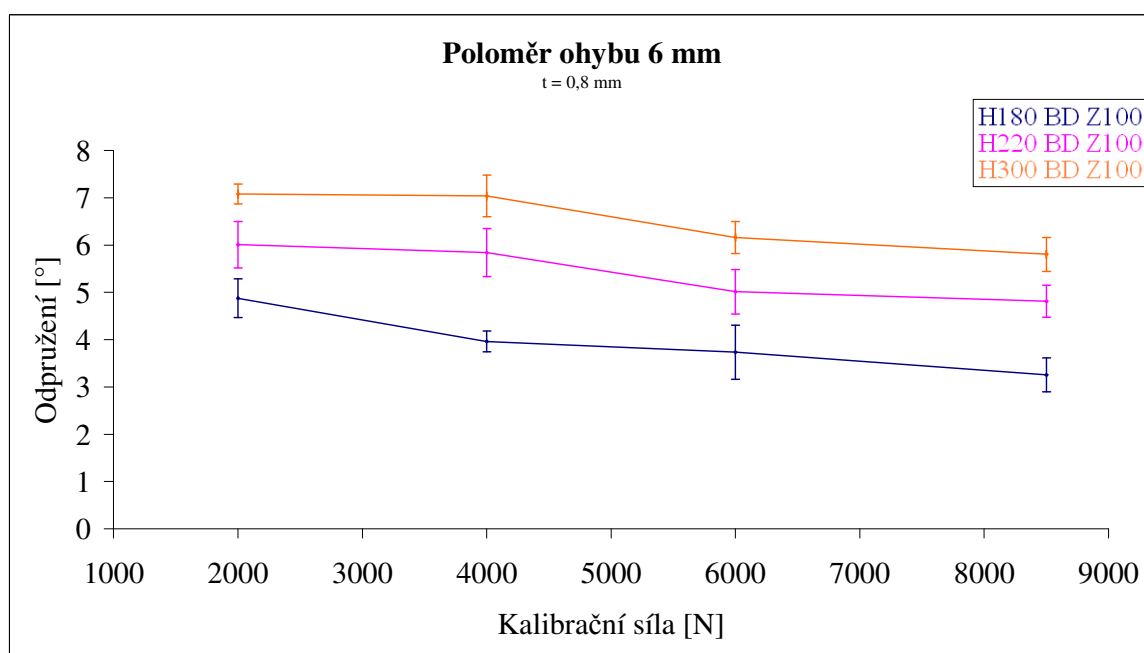
Obr. 3.4.4.14: Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé materiály,
poloměr ohybu 1 mm, tloušťka 0,8 mm



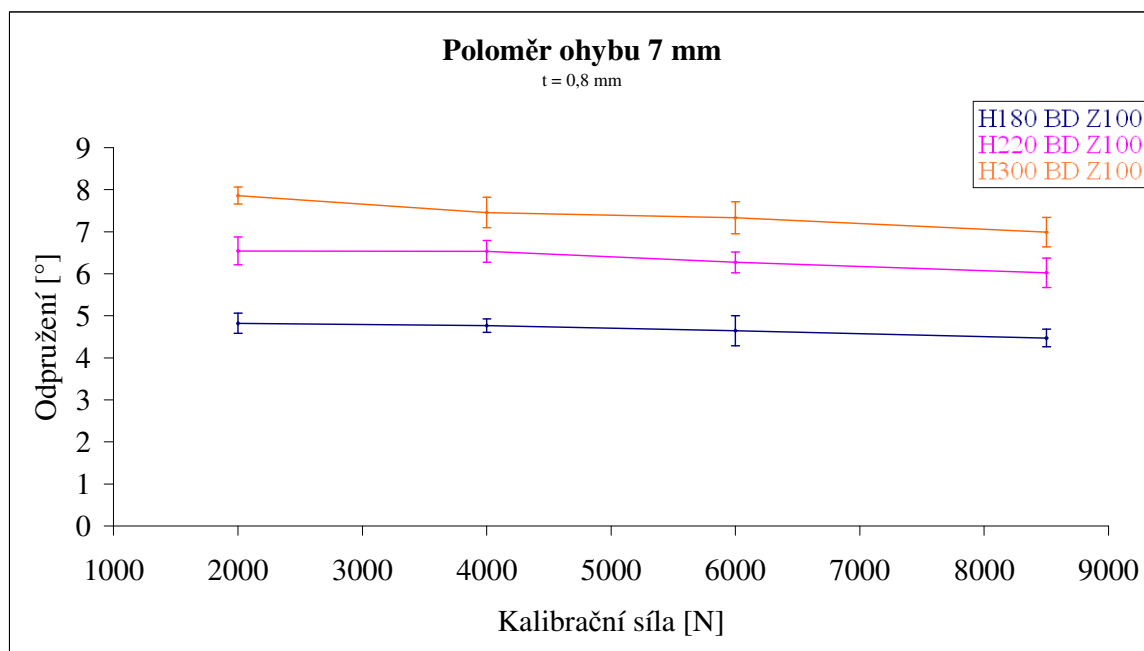
Obr. 3.4.4.15. – Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé materiály,
poloměr ohybu 2,5 mm, tloušťka 0,8 mm



Obr. 3.4.4.16. – Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé materiály,
poloměr ohybu 3,5 mm, tloušťka 0,8 mm

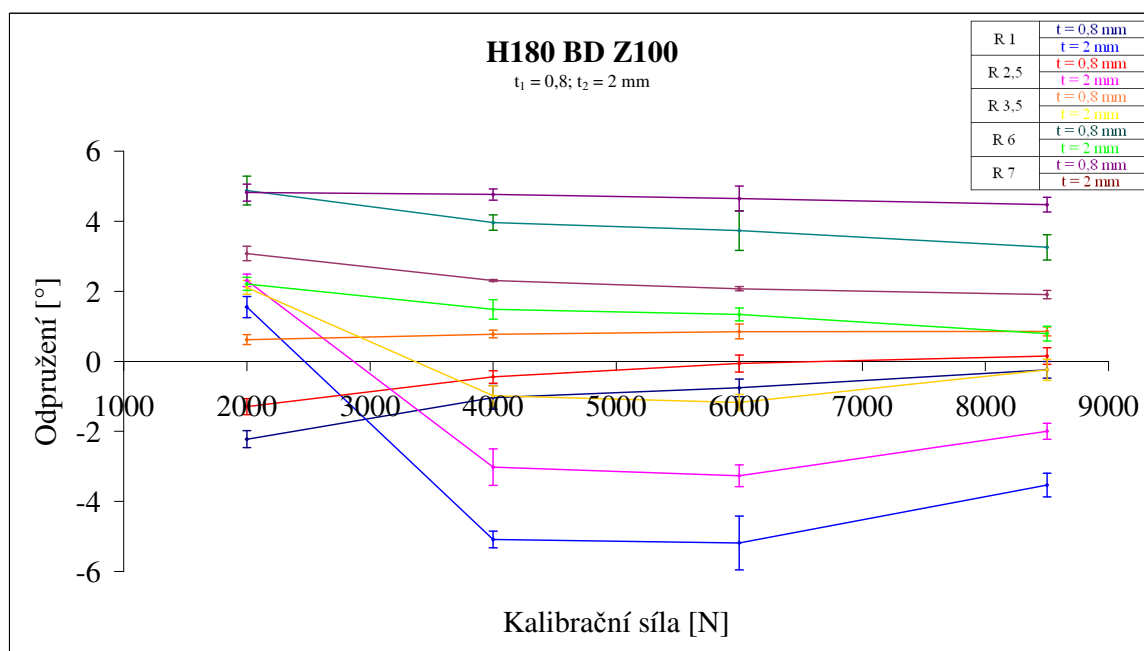


Obr. 3.4.4.17: Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé materiály,
poloměr ohybu 6 mm, tloušťka 0,8 mm



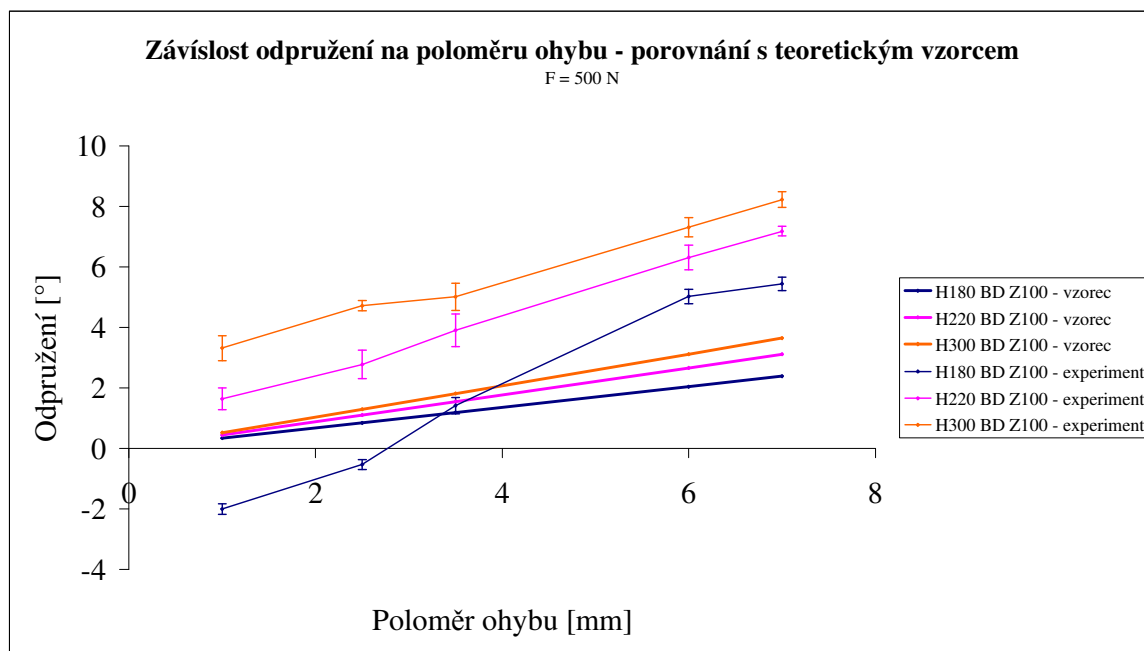
Obr. 3.4.4.18: Závislost odpružení na kalibrační síle pro různé materiály, poloměr ohybu 7 mm, tloušťka 0,8 mm

Závislosti odpružení na kalibrační síle se změnou tloušťky jsou pro materiál H180 BD Z100 graficky zpracovány na obr. 3.4.4.19., jedná se pouze o odpružení při kalibraci bez hodnot odpružení při volném ohybu.

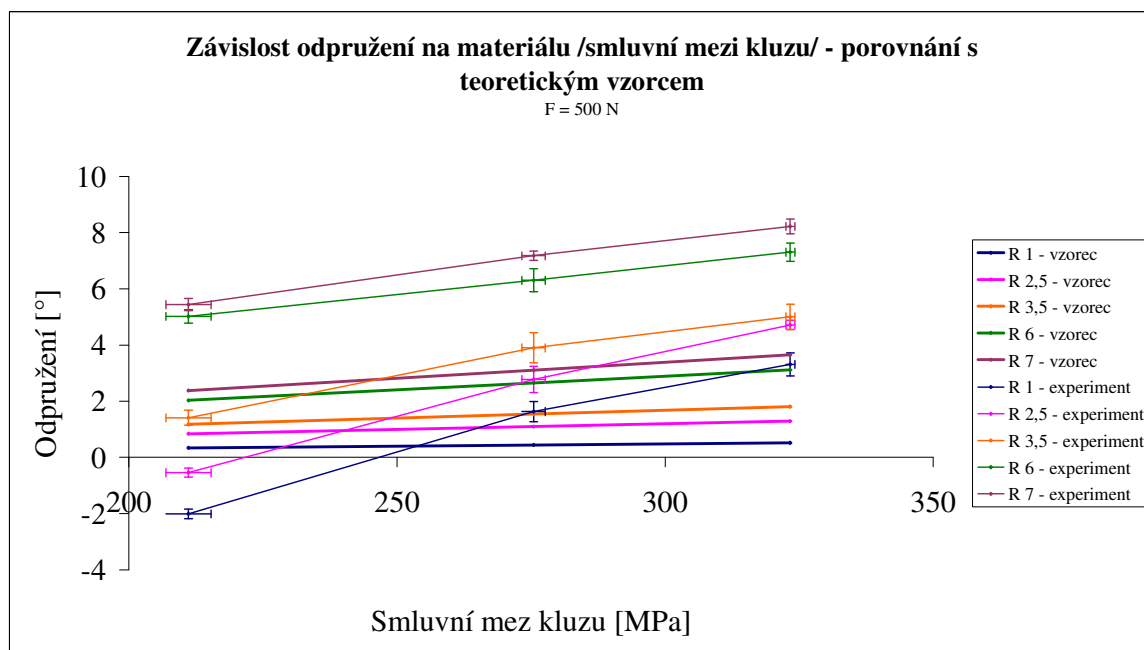


Obr. 3.4.4.19: Závislost odpružení na kalibrační síle se změnou tloušťky a s různými poloměry ohybu

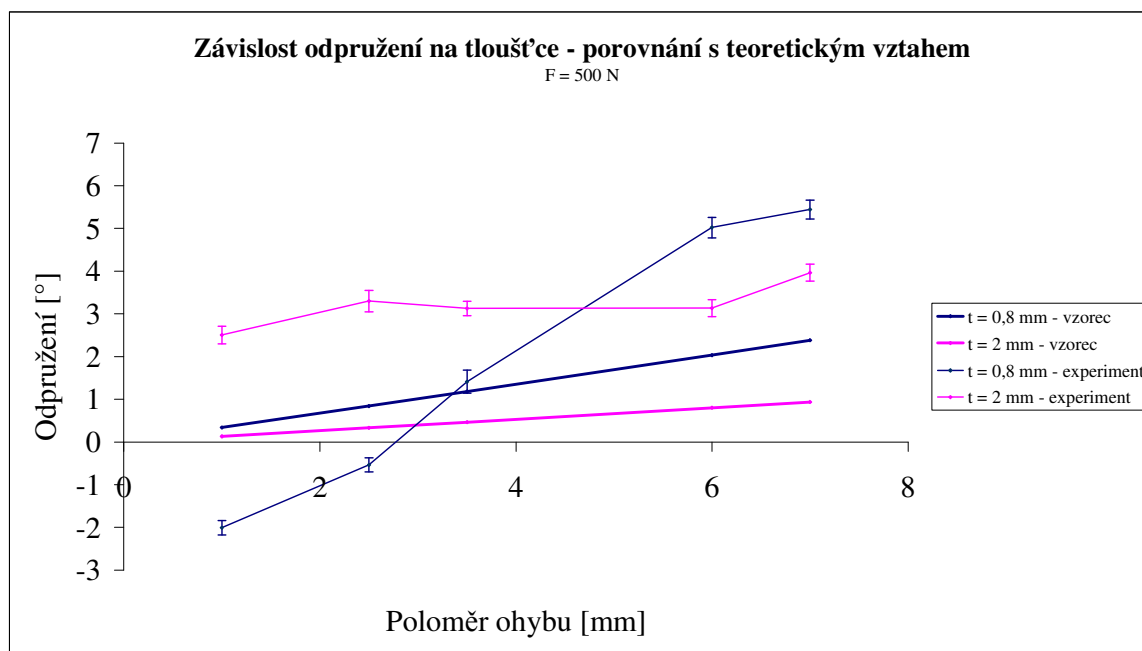
Porovnání odpružení zjištěných experimentálně s odpružením získaným výpočtem z teoretického vztahu (2.1.8.3.16.) je v grafech na obr. 3.4.4.20. až 3.4.4.22. Jedná se o porovnání pouze v případě volného ohybu, neboť v teoretickém vzorci není zahrnut vliv kalibrační síly na odpružení. Odpružení bylo porovnáno v závislostech na poloměru ohybu, smluvní meze kluzu a z hlediska různé tloušťky materiálu.



Obr. 3.4.4.20: Porovnání odpružení v závislosti na poloměru ohybu s teoretickým vztahem při volném ohybu



Obr. 3.4.4.21: Porovnání odpružení v závislosti na smluvní meze kluzu materiálu s teoretickým vztahem při volném ohybu

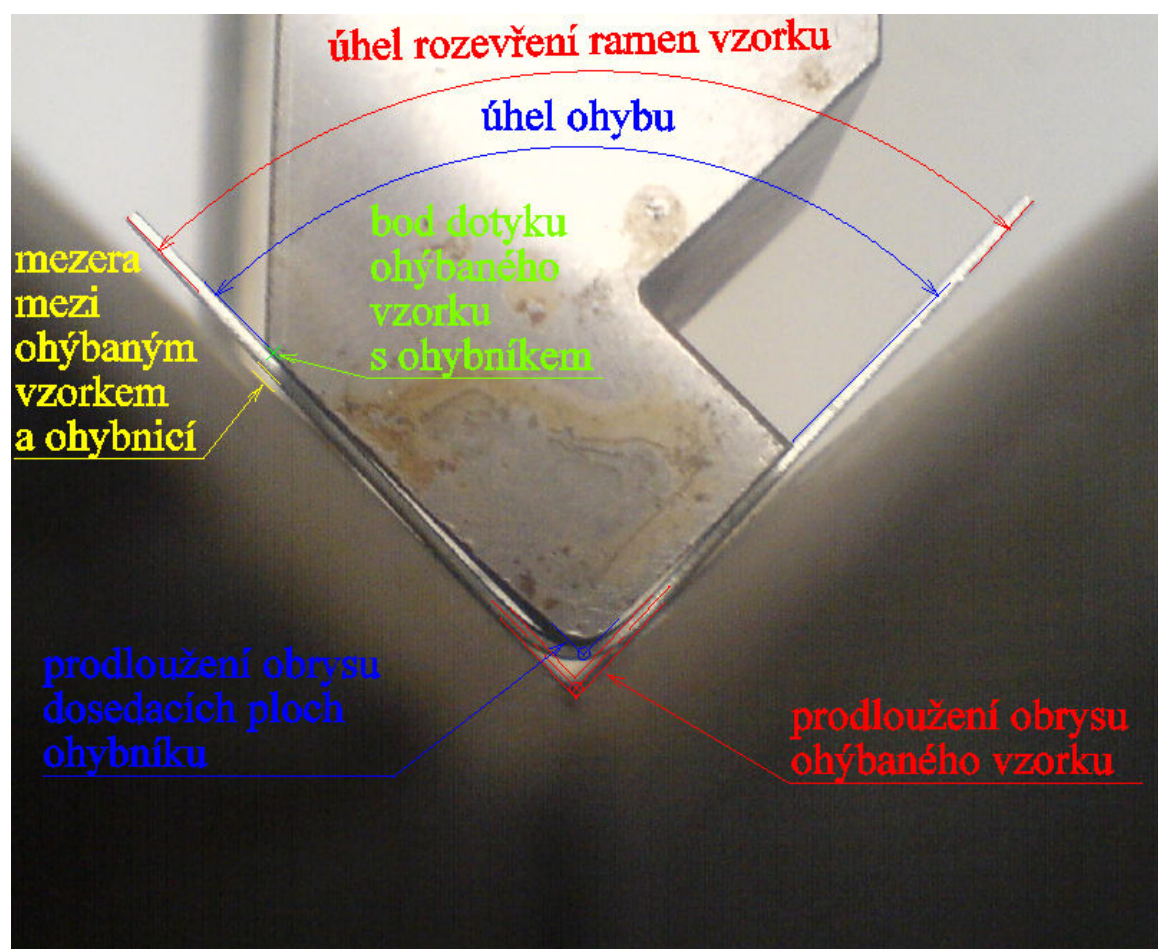


Obr. 3.4.4.22: Porovnání odpružení v závislosti na tloušťce materiálu s teoretickým vztahem při volném ohybu

3.4.5 Rozbor získaných výsledků

Z grafických závislostí je patrné, že v případě malých poloměrů ohybu (do 3,5 mm) všechny zkoušené materiály o jmenovité tloušťce 0,8 mm odpružily nejméně při kalibrační síle 2 kN. Další zvýšení kalibrační síly již vedlo ke zvětšení velikosti odpružení. Vysvětlení, proč k tomu jevu došlo, včetně vysvětlení, proč se velikosti odpružení v těchto případech pohybovaly většinou v záporných hodnotách, bych podal následující analýzou.

V průběhu kalibrace se materiál dostane do okamžiku, který zachycuje obr. 3.4.5.1. Je to okamžik, kdy dojde k opětovnému dotyku ohýbaného materiálu s ohybníkem ve vzdálených částech od místa ohybu. Ramena ohýbaného výlisku v tomto okamžiku svírají úhel ohybu znatelně menší než je úhel ohybu dosedacích ploch ohybníku, jak je vyznačeno na obr. 3.4.5.1.

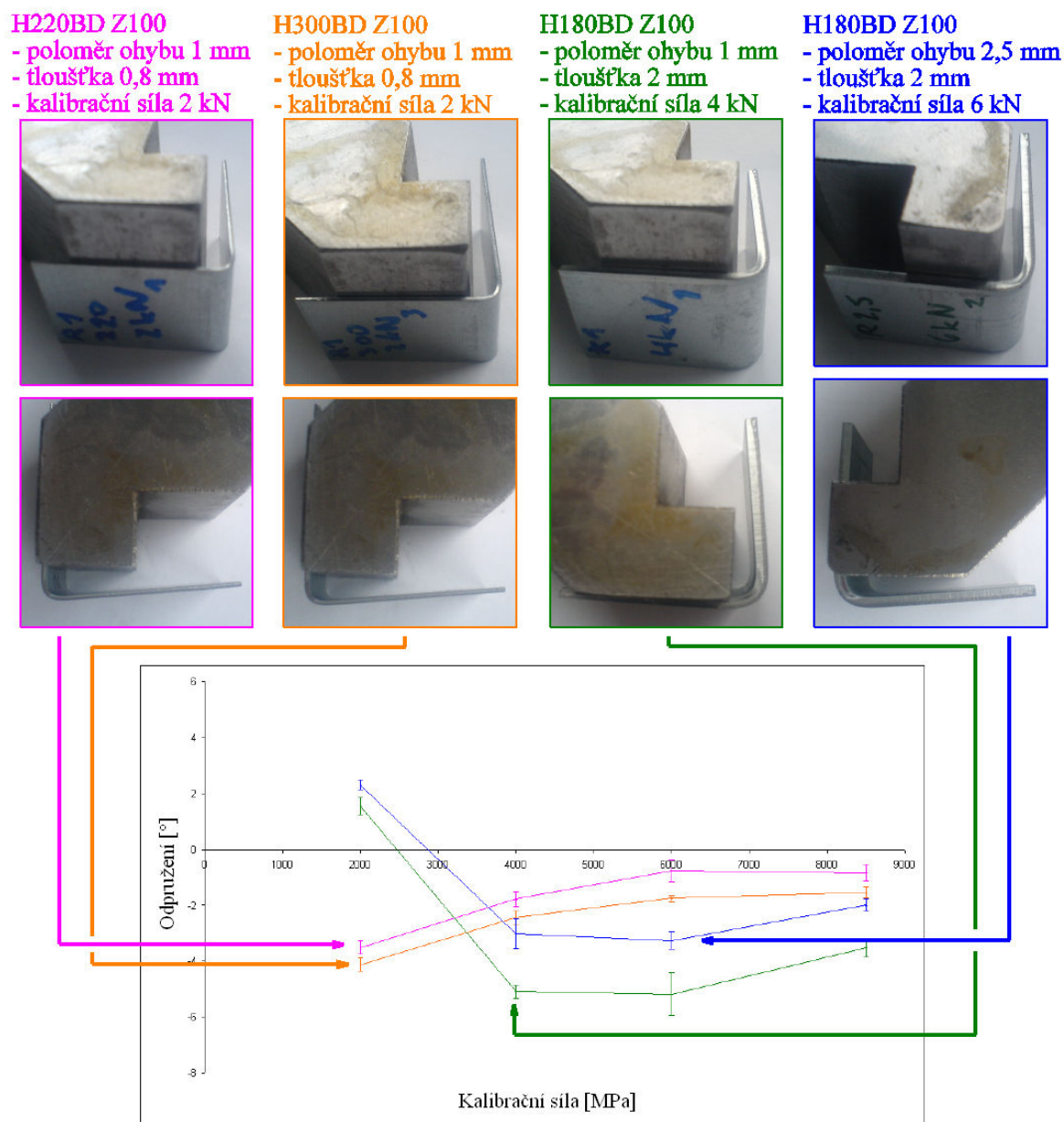


Obr. 3.4.5.1: Ramena ohýbaného materiálu v okamžiku dotyku s ohybníkem ve vzdálených částech od místa ohybu, H180 BD Z100 tloušťky 0,8 mm, poloměr ohybu 2,5 mm

Budeme předpokládat, že došlo pouze k bodovému dotyku ohybníku a ohýbaného materiálu bez silového působení na ohýbaný materiál. Pokud bude kalibrace v tomto okamžiku ukončena, změní se výsledný tvar ohýbaného plechu od tvaru na obr. 3.4.5.1. pouze o velikost odpružení, na které jako průvodní jev plastické deformace bude mít vliv pouze deformovaná část objemu materiálu v místě ohybu.

Poněvadž se jednalo o malé poloměry ohybu, bylo přetvoření materiálu realizováno na malém objemu. Tím došlo k velmi malému rozevření ramen, které nedosáhlo velikosti úhlu ohybu dosedacích ploch ohybníku, odpružení se v těchto případech tedy pohybovala v záporných hodnotách.

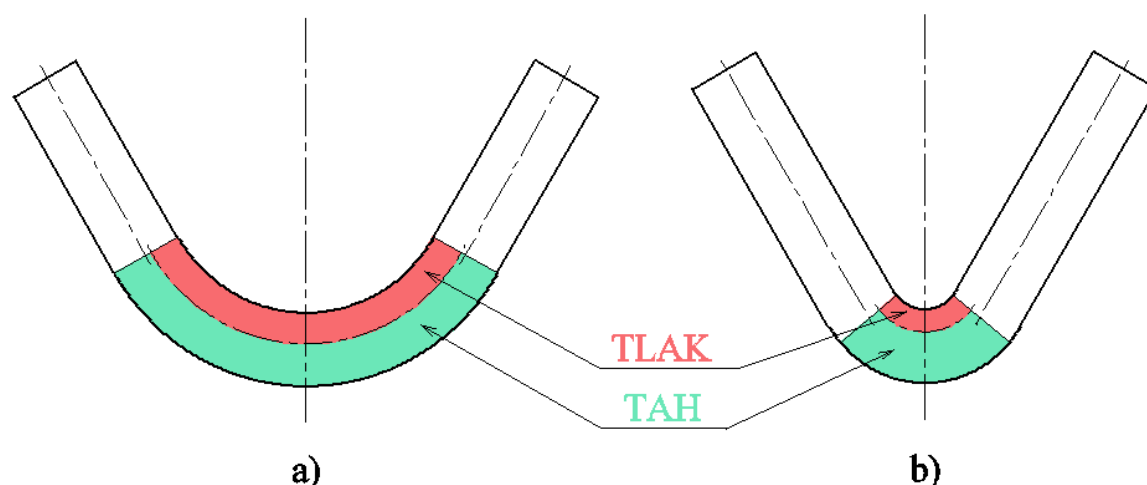
Důkazem je obr. 3.4.5.2. na kterém je vždy jedno rameno ohnutého výlisku přiloženo k dosedací ploše ohybníku a na druhém rameni je vidět, že výsledná hodnota odpružení vzorku je opravdu záporná.



Obr. 3.4.5.2: Záporné hodnoty odpružení vybraných vzorků

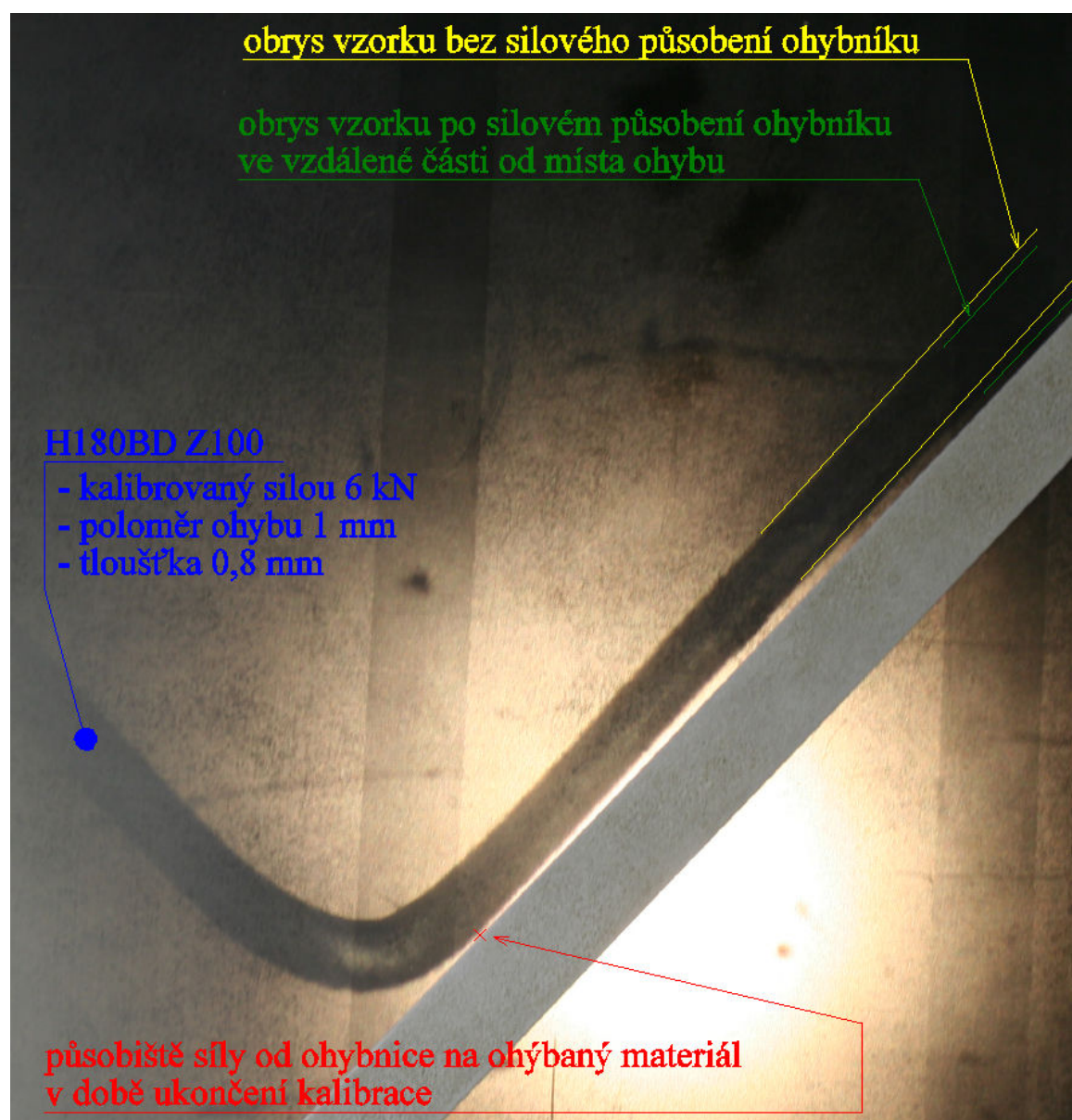
Pokud se bude v kalibraci dále pokračovat, začne ohybník na ohýbaný materiál působit silou ve vzdálených částech od místa ohybu. Bude docházet k zmenšování mezery mezi ohybníkem a ohybnicí za současného přiléhání obou ramen ohýbaného předmětu k ohybnici. Současně se bude zvětšovat tření mezi ohýbaným materiálem a oběma částmi ohýbacího nástroje. Jeho důsledkem budou ramena ohýbaného plechu držena ohybníkem a ohybnicí a přestanou mít vliv na velikost odpružení i na další průběh kalibrace. Následně ohybník svým silovým působením za současného posuvu vtlačí deformovanou část materiálu v místě ohybu níže do volného prostoru pod místem ohybu. Kalibrační síla je již tak velká, že způsobí, především v případě poloměru ohybu 1 mm, extrémně malé

zaoblení ohýbaného plechu s extrémně velkým přetvořením materiálu. Možnost, že by v tomto případě docházelo k přetvoření materiálu dvojčatěním, které je typické pro případy velké míry přetvoření na malém objemu při tváření materiálu za studena, je vyloučena vzhledem k velmi malé rychlosti pohybu ohybníku, která byla 4 mm/min. Materiál je tedy přetvořen skluzem dislokací na velmi malém objemu, což má za následek velké zahuštění dislokací a zabránění jejich pohybu. Zároveň dojde k výraznému posuvu neutrální osy k vnitřní straně ohybu, jak je znázorněno na obr. 3.4.5.3. v bodě b). Výrazně se tím změní poměr oblastí tahových a tlakových napětí v deformované části objemu materiálu ve prospěch tahových napětí, ve které také dojde k výraznějšímu přetvoření. Oblast tlakových napětí je také výrazně přetvořena, ale vzhledem k jejímu malému objemu nemá velký význam. Převažující oblast tahových napětí tak způsobí ještě větší odpružení materiálu.



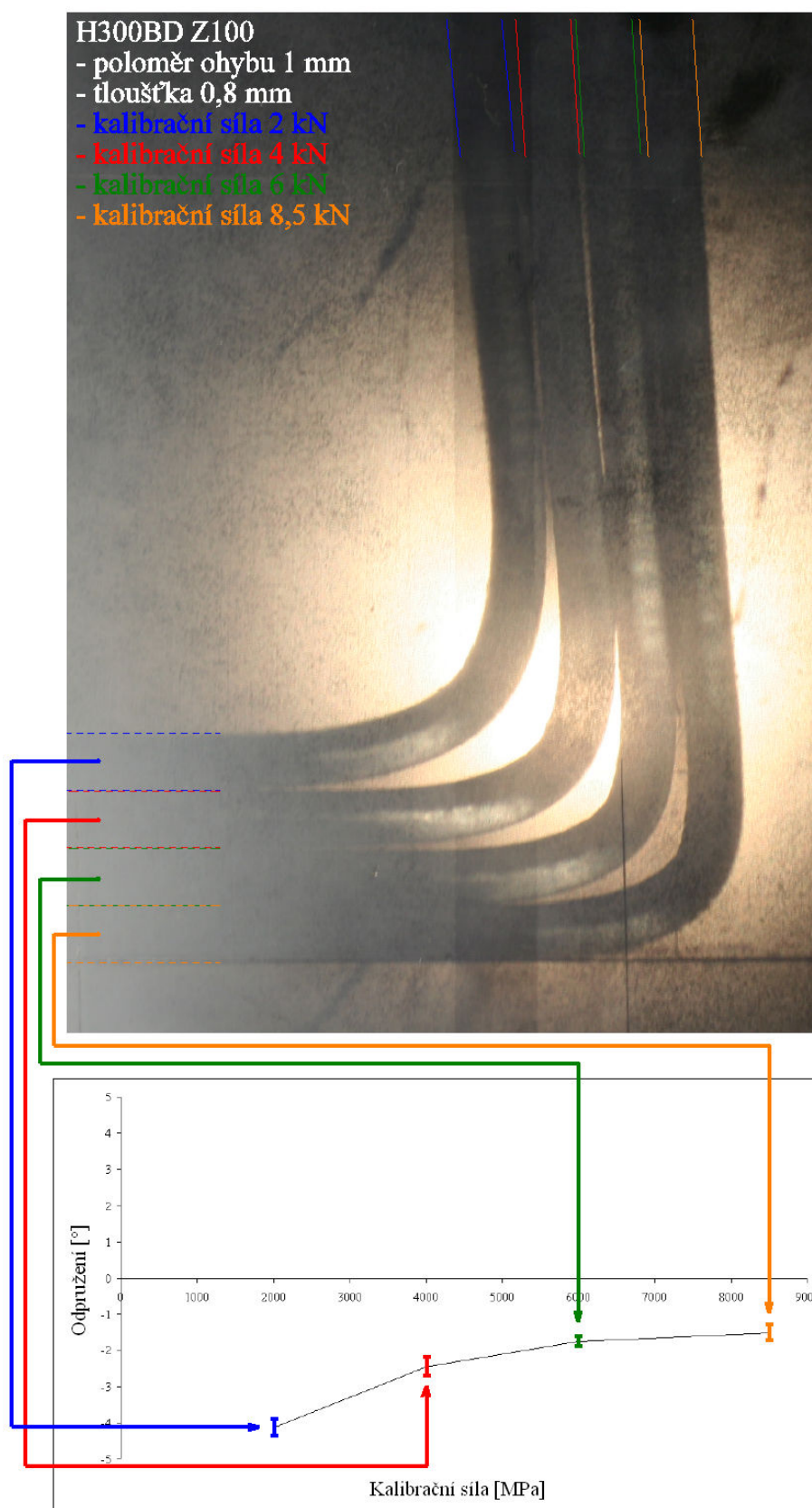
Obr. 3.4.5.3: Oblasti tahových a tlakových napětí pro různé poloměry ohybu

Přesvědčit se o tom lze na obr. 3.4.5.4., na kterém je vidět obrys materiálu H180 BD Z100 na Profil - Projektoru, byl ohýbán poloměrem ohybu 1 mm a kalibrován silou 6 kN. Pro daný materiál se jedná o dostatečně velkou kalibrační sílu na to, aby došlo k výše uvedenému jevu. Velikost zvětšení odpružení je v obrázku zakreslena.



Obr. 3.4.5.4: Praktická ukázka vlivu silového působení ohybníku ve vzdálené části od místa ohybu na ohýbaný materiál

Porovnání obrysů vzorků na obr. 3.4.5.5. je důkazem, že k opětovnému dotyku vzorku s ohybníkem pro materiály tloušťky 0,8 mm došlo přibližně při kalibrační síle 2 kN. Pro uvedené technologické podmínky ohybu vede další zvýšení kalibrační síly ke zvětšení odpružení jak je na obrázku patrné.



Obr. 3.4.5.5: Porovnání odpružení vzorků na Profil-Projektoru pro různé velikosti kalibračních sil; H300 BD Z100; tloušťka materiálu 0,8 mm; poloměr ohybu 1 mm

Pro tloušťku materiálu 2 mm dochází u malých poloměrů ohybu do 3,5 mm k opětovnému dotyku ohýbaného materiálu s ohybníkem ve vzdálených částech od místa ohybu také, ale při vyšších kalibračních silách. Je to způsobeno tím, že větší tloušťka materiálu klade větší odpor proti přetvoření. Podle grafu 3.4.4.13. bych usoudil, že k dotyku dochází při kalibrační síle přibližně 5 kN. Při této síle bych doporučoval kalibraci ukončit v případě, že je požadováno docílit nejmenší hodnoty odpružení. Odpružení se pro malé poloměry ohybu pohybovalo v záporných hodnotách (obr. 3.4.5.2.) ze stejného důvodu, který je uveden pro materiály tloušťky 0,8 mm.

U větších poloměrů ohybu než 3,5 mm, jak je vidět z grafů na obr. 3.4.4.1 až 3.4.4.3. vzhledem k protnutí kalibračních křivek, už k opětovnému dotyku ohybníku ve vzdálených částech od místa ohybu nedochází. Ohýbaný materiál je postupně „nabalován“ na ohybník a průběh kalibrace, včetně silového působení je blízký uvedenému v kap. 2.1.8.5. S vyšší kalibrační silou dochází ke snižování odpružení, avšak ne příliš výraznému. Rozdíl mezi kalibračními silami 2 kN a 6 kN způsobí pro všechny zkoušené materiály tloušťky 0,8 mm změnu v odpružení přibližně o 1°, zvýšením kalibrační síly o 1 kN se tedy materiál zkalibruje pouze o 15'. Z tohoto důvodu je vhodné posoudit, do jaké míry je v těchto případech vhodné materiál kalibrovat, protože použití vysokých kalibračních sil vede k rychlejšímu opotřebení nástrojů.

Porovnání odpružení materiálu zjištěného experimentálně s teoretickým vztahem 2.1.8.3.16. bylo provedeno pouze pro volný ohyb bez kalibrace. (obr. 3.4.4.20. až 3.4.4.22.)

V grafu na obr. 3.4.4.21. je zhotovena závislost odpružení na smluvní mezi kluzu pro různé poloměry ohybu. Průběhy křivek ukazují, že vliv materiálu na odpružení je větší než předpokládá teoretický vztah. Pokud dochází ke změně materiálu při volném ohýbání, nelze tuto změnu nikdy podcenit, neboť vychází, že materiály s rozdílem pevnosti na mezi kluzu 100 MPa v případě hlubokotažných ocelí odpruží s rozdílem 2°. Takový rozdíl již vede ve většině případů k nedodržení geometrických tolerancí, proto je potřeba provádět materiálové zkoušky vzorků při sériové výrobě, a přesvědčit se, zda-li opravdu splňují požadované mechanické vlastnosti.

Grafy závislosti odpružení na poloměru ohybu a tloušťky materiálu (obr. 3.4.4.20., obr. 3.4.4.22.) jsou důkazem toho, že se hodnoty získané z teoretických vztahů pro výpočet odpružení v praxi příliš neshodují s odpružením zjištěným experimentálně. Je to způsobeno velkým počtem a nejednotností teoretických vztahů, které často obsahují množství koeficientů v praxi často obtížně zjistitelných. Z tohoto důvodu je potřeba

odpružení raději experimentálně odzkoušet jak doporučuje ČSN 22 7340. Změna poloměru ohybu i tloušťky materiálu vyvolá mnohem větší změnu, než předpokládá teoretický vztah.

4 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo stanovení vlivu mechanických hodnot na velikost odpružení při ohýbání hlubokotažných plechů. Zkoušenými materiály byly žárově pozinkované hlubokotažné plechy H180 BD Z100, H220 BD Z100 a H300 BD Z100 (označení podle EN 10027-1) běžně používané pro stavbu karoserie automobilů. Ohyb byl prováděn na ohýbadle ve tvaru „V“ s úhlem ohybu 90° . Součástí ohýbání byla kalibrace materiálu, při které byl prioritním posuzovaným faktorem vliv kalibrační síly na velikost odpružení. Při měření se měnily mechanické hodnoty materiálů, poloměr ohybu, tloušťka materiálu a posuzoval se jejich vliv na velikost odpružení při určité kalibrační síle. Součástí diplomové práce je i grafické porovnání velikosti odpružení s teoretickým vztahem, ovšem pouze pro případ volného ohýbání.

Bylo zjištěno, že pro malé poloměry ohybu do 3,5 mm má na velikost odpružení velký vliv okamžik, kdy při kalibraci dojde k dotyku ohýbaného materiálu s ohybníkem ve vzdálené části od místa ohybu. Ten začne na ramena ohýbaného materiálu působit silou a bude docházet k jejich přitlačování k ohybnici za současněho zmenšování mezery mezi ohybníkem a ohybnicí. Rovněž dojde k nárůstu tření mezi ohýbaným materiálem a činnými částmi nástroje. Důsledkem tření budou ramena ohýbaného plechu pevně držena ohybníkem a ohybnicí a pro odpružení bude mít rozhodující vliv deformovaná oblast ohýbaného plechu v místě ohybu. Působením velké kalibrační síly ohybník tuto oblast stlačí ještě níže k ohybnici. Dojde k jejímu výraznému zakřivení, pro velmi malé poloměry ohybu až k extrémně malému. Tím vznikne v deformované oblasti výrazné přetvoření materiálu na velmi malém objemu, je realizováno pouze skluzem dislokací vzhledem k velmi malé rychlosti pohybu ohybníku, která je 4 mm/min. Současně se neutrální osa materiálu výrazně posune k vnitřní straně ohybu, výrazně tím v materiálu převáží oblast tahových napětí nad tlakovými. Oblast tahových napětí způsobí, že dojde k nárůstu odpružení materiálu.

Pro větší tloušťku materiálu dochází k dotyku materiálu ve vzdálených částech od místa ohybu při větších kalibračních silách. Je to dáno tím že větší tloušťka klade větší přetvárný odpor k tomu, aby byl materiál přetvořen. Pro všechny druhy zkoušených materiálů tloušťky 0,8 mm k tomuto jevu dochází při kalibrační síle 2 kN, pro materiály H180 BD Z100 tloušťky 2 mm přibližně při síle 5 kN. Podrobněji je tato problematika popsána v kap. 3.4.5., ve které je také uveden důvod, proč se velikosti odpružení v případě malých poloměrů ohybu pohybovaly v záporných hodnotách.

Při větších poloměrech ohybu než 3,5 mm se zvětšující se kalibrační silou k výše zmíněnému jevu již nedochází, ohýbaný plech postupně přiléhá k ohybníku a odpružení se snižuje, ovšem velmi málo. Např. pro všechny zkoušené materiály tloušťky 0,8 mm vedlo zvýšení kalibrační síly o 1 kN k průměrné kalibraci materiálu pouze o 15'. S rostoucím poloměrem ohybu dochází k většímu snížení odpružení, avšak k výraznější eliminaci by již bylo potřeba velkých kalibračních sil, které vedou k opotřebení nástrojů. Z ekonomického hlediska by pro snížení odpružení bylo vhodnější použít materiál s nižšími mechanickými vlastnostmi pokud to konstrukce umožňuje, neboť změna materiálu vede k mnohem výraznějšímu snížení odpružení než velikost kalibrační síly. Tímto je třeba zdůraznit potřebu provádění zkoušek materiálu při sériové výrobě pro získání mechanických charakteristik materiálu. Jejich provedením je získána určitá jistota, že materiál neodpruží víc než je dovolená tolerance. V případě hlubokotažných ocelí výrobce zaručuje většinou minimální smluvní mez kluzu materiálu podle příslušného označení, velikost odpružení se však se zvýšením meze kluzu zvětšuje. Pohybuje-li se tedy materiál na horní hranici rozmezí mechanických hodnot nebo jedná-li se o deformačně vystálý materiál, vede to k velkému vzrůstu odpružení a k nedodržení předepsaných geometrických tolerancí.

V případě této diplomové práce byly mechanické hodnoty materiálů zjištěny ze statické zkoušky tahem. Její výsledky jsou uvedené v kap. 3.2.2., zjišťovány byly hlavní mechanické vlastnosti materiálu včetně exponentu deformačního zpevnění, který je směrodatným parametrem z hlediska tváritelnosti plechů.

Z výsledků diplomové práce vyplývají tyto návrhy pro praktické použití:

Zkoušené plechy H180 BD Z100, H220 BD Z100 a H300 BD Z100 je vhodné kalibrovat s poloměry ohybu většími než 3,5 mm. Toto tvrzení by mělo platit pro plechy tloušťky 0,8 až 2 mm. Velikosti snížení odpružení jsou uvedeny v kap. 3.4.4., doporučoval bych posoudit, zda-li není ekonomicky výhodnější použít plech jiných mechanických vlastností, případně jiné tloušťky.

Pro poloměry ohybu menší než 3,5 mm doporučuji kalibraci ukončit v okamžiku, kdy dojde k opětovnému dotyku ohybníku ve vzdálené části od místa ohybu. Při jaké kalibrační síle k tomu dochází je obtížné určit, záleží to především na tloušťce materiálu, ovšem nelze vyloučit ani vliv mechanických vlastností materiálu, poloměru ohybu či jiných faktorů.

Je nutné vzít v úvahu, že ohyb byl prováděn pouze pro jedno konstrukční řešení nástroje. Jiné konstrukční řešení, avšak i nepatrně odlišná geometrie nástroje, povedou

k jiné situaci při kalibraci materiálu, odlišnému silovému působení na ohýbaný plech, a tím k rozdílnému odpružení při určité kalibrační síle. Doporučuji tedy stejně jako norma ČSN 22 7340 odpružení materiálu experimentálně odzkoušet, případně využít některý z konstrukčních způsobů eliminace odpružení uvedených v kap. 2.1.8.2.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BLAŠČÍK, F. a kol.: *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarania*. Bratislava: Alfa, 1988. 832 s.
- [2] ELFMARK, J. a kol.: *Tváření kovů*. Praha: SNTL, 1992. 528 s.
- [3] ČERNOCH, S.: *Strojně technická příručka – svazek 2*. Praha: SNTL, 1977. 2568 s.
- [4] FOREJT, M.: *Teorie tváření*. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1992. 167 s. ISBN 80-214-0415-9
- [5] BENKO, B.; MÄSIAR, H.; KOTRAS, P.: *Technológia tvárnenia, zlievania a zvarania - Návodý na cvičenia*. Bratislava: Slovenská vysoká škola technická v Bratislave, 1991. 201 s. ISBN 80-227-0340-0
- [6] NOVOTNÝ, J.; ŠANOVEC, J.; BEDNÁŘ, B.; KREIBICH, V.: *Technologie I (Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Praha: ČVUT, 2001. 227 s. ISBN 80-01-02351-6
- [7] LENFELD P.: *Technologie II. – 1.část (Tváření kovů)*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. 110 s. ISBN 80-7372-020-5
- [8] JELÍNEK, M.: *Tvarová a rozměrová přesnost výlisků při ohýbání plechů* [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1997. 97 s.
- [9] MADER, J.: *Odpružení při ohýbání plechů* [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1996. 96 s.
- [10] MRÁZ, P.: *Tvarová a rozměrová přesnost výlisků při ohýbání plechů* [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1996. 96 s.
- [11] HOLINA, J.: *Určení mezních stavů a velikosti odpružení při ohýbání pevnostního plechu* [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003. 75 s.
- [12] HAŠEK, V.: *Tváření kovů za studena*. Praha: SNTL, 1958. 194 s.
- [13] The Ohio State University, [25.4.2007]
<http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/BendingOverview/html/variables_of_springback.html>
- [14] MARCINIAK, Z.: *Teorie tváření plechů*. Praha: SNTL, 1964. 260 s.
- [15] Voestalpine – Normenvergleich, [4.5.2007]
<https://www.voestalpine.com/stahl/de/site/downloads/technical_delivery_conditions.ContentPar.1891.File.tmp/9_Normenvergleich.pdf>

- [16] fa. Corus Strip Products UK: About Galvatite, [4.5.2007]
<http://www.corusautomotive.com/file_source/StaticFiles/Business%20Units/CSP%20UK/Galvatite_Bro2.pdf>
- [17] Voestalpine – Feuerverzinktesstahlband, [4.5.2007]
<http://www.voestalpine.com/stahl/de/site/downloads/technical_delivery_conditions.ContentPar.4667.File.tmp/5_FVZStahlband.pdf>
- [18] ČMELÍK, M.; MACHONSKÝ, L.; BURIANOVÁ, L.: *Úvod do fyzikálních měření*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. 82 s. ISBN 80-7083-534-6
- [19] LANKAŠ, J.: *Stanovení vlivu mechanických hodnot na velikost odpružení při volném ohybu* [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. 63 s.
- [20] JELÍNEK, P.: *Vliv způsobu dělení materiálu na jeho následné plastické vlastnosti* [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. 83 s.
- [21] MARCINIAK, Z.: *Mechanika procesów tłoczenia blach*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Naukowotechniczne, 1961. 271 s.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Tabulky koeficientů normálové anizotropie

Příloha 2: Protokoly ze zkoušky ohybem

Příloha č. 1

H180 BD Z100								
tloušťka plechu 0,8 mm								
směr válcování	číslo vzorku	Původní rozměry		Rozměry po natažení		r [-]	r _{střední} [-]	směrodatná odchylka
		b ₀ [mm]	l ₀ [mm]	b [mm]	l [mm]			
0°	1	19,63	80,016	17,49	95,840	1,773	1,760	0,016
	2	19,64	80,029	17,52	95,790	1,746		
	3	19,63	79,992	17,52	95,541	1,761		
	4	19,63	79,991	17,50	95,722	1,781		
	5	20,16	80,007	17,99	95,764	1,746		
45°	1	19,49	79,934	17,47	95,670	1,543	1,537	0,007
	2	19,48	80,005	17,48	95,676	1,540		
	3	19,53	79,975	17,53	95,639	1,527		
	4	19,55	80,015	17,54	95,676	1,542		
	5	19,54	80,009	17,53	95,700	1,542		
90°	1	19,69	80,018	17,40	95,798	2,193	2,203	0,010
	2	19,68	80,023	17,39	95,788	2,201		
	3	19,69	80,018	17,40	95,770	2,219		
	4	19,68	80,007	17,38	95,875	2,196		
	5	19,68	80,014	17,35	96,160	2,204		
Směrově střední velikost koeficientu normálové anizotropie:						1,759		

H220 BD Z100								
tloušťka 0,8 mm								
směr válcování	číslo vzorku	Původní rozměry		Rozměry po natažení		r [-]	r _{střední} [-]	směrodatná odchylka
		b ₀ [mm]	l ₀ [mm]	b [mm]	l [mm]			
0°	1	19,77	80,006	18,00	95,658	1,106	1,110	0,019
	2	19,76	79,990	18,00	95,644	1,094		
	3	19,77	79,983	17,99	95,749	1,096		
	4	19,77	80,265	18,00	95,641	1,142		
	5	19,78	79,999	17,99	95,705	1,113		
45°	1	19,79	79,964	18,22	95,838	0,842	0,860	0,013
	2	19,80	79,995	18,24	95,512	0,863		
	3	19,81	79,991	18,25	95,627	0,851		
	4	19,81	79,968	18,23	95,639	0,871		
	5	19,81	79,987	18,24	95,680	0,872		
90°	1	22,26	79,965	20,09	95,523	1,361	1,351	0,012
	2	22,23	79,987	20,04	95,838	1,342		
	3	22,25	79,980	20,08	95,587	1,357		
	4	22,28	80,011	20,12	95,631	1,335		
	5	22,27	79,984	20,11	95,466	1,360		
Směrově střední velikost koeficientu normálové anizotropie:						1,045		

H300 BD Z100								
tloušťka 0,8 mm								
směr válcování	číslo vzorku	Původní rozměry		Rozměry po natažení		r [-]	r _{střední} [-]	směrodatná odchylka
		b ₀ [mm]	l ₀ [mm]	b [mm]	l [mm]			
0°	1	22,20	79,990	20,07	95,634	1,300	1,281	0,015
	2	22,25	79,994	20,15	95,554	1,263		
	3	22,23	79,992	20,12	95,596	1,271		
	4	22,21	79,991	20,09	95,628	1,282		
	5	22,27	79,990	20,14	95,609	1,290		
45°	1	22,01	79,990	20,15	95,550	0,991	0,947	0,038
	2	22,07	79,996	20,27	95,776	0,891		
	3	22,04	79,999	20,20	95,618	0,960		
	4	22,01	80,002	20,20	95,605	0,929		
	5	21,94	79,992	20,10	95,623	0,962		
90°	1	22,35	79,969	19,98	95,598	1,675	1,666	0,022
	2	22,44	79,983	20,05	95,707	1,700		
	3	22,39	79,982	20,01	95,797	1,646		
	4	22,29	80,000	19,93	95,741	1,651		
	5	22,39	79,992	20,02	95,718	1,655		
Směrově střední velikost koeficientu normálové anizotropie:						1,210		

H180 BD Z100								
tloušťka plechu 2 mm								
směr válcování	číslo vzorku	Původní rozměry		Rozměry po natažení		r [-]	r _{střední} [-]	směrodatná odchylka
		b ₀ [mm]	l ₀ [mm]	b [mm]	l [mm]			
0°	1	22,29	79,932	19,99	96,275	1,412	1,432	0,043
	2	22,32	79,980	20,02	96,251	1,418		
	3	22,31	79,952	19,98	96,185	1,480		
	4	22,29	80,002	20,01	96,350	1,378		
	5	22,30	79,973	19,99	96,093	1,472		
45°	1	21,79	79,995	19,51	96,292	1,475	1,423	0,044
	2	21,81	79,968	19,53	96,303	1,458		
	3	21,83	79,982	19,59	96,326	1,394		
	4	21,85	79,973	19,63	96,254	1,371		
	5	21,86	79,962	19,61	96,269	1,416		
90°	1	22,49	79,955	19,91	96,216	1,926	1,877	0,065
	2	22,33	79,951	19,75	96,290	1,950		
	3	22,35	79,972	19,82	96,225	1,852		
	4	22,37	79,993	19,85	96,386	1,786		
	5	22,47	79,963	19,90	96,348	1,870		
Směrově střední velikost koeficientu normálové anizotropie:						1,539		

Příloha č. 2

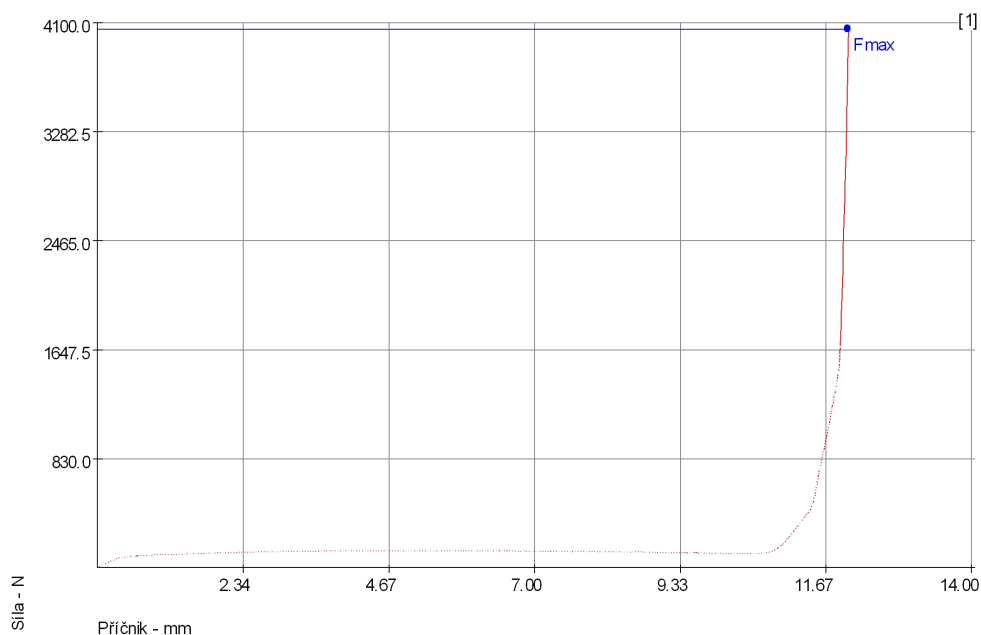
Zkouška ohybem

Vstupní hodnoty

Název materiálu: : H180 BD Z100 Datum testu : 12.4.2007
Smer odebrání vzorku: : 0° Vypracoval : Trdla Jiri
Rozmer vzorku: : 20 x 0,8 mm :
Polomer ohybu : 2,5 mm :

Výstupní hodnoty

Zkouška	Fmax N
1	4048.53
2	3982.59
3	3956.22
4	3962.81
x	3987.54
s	42.18



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů
Hálkova 6, 461 17 Liberec 1

Tel.: +420 485 353374, +420 605 957404

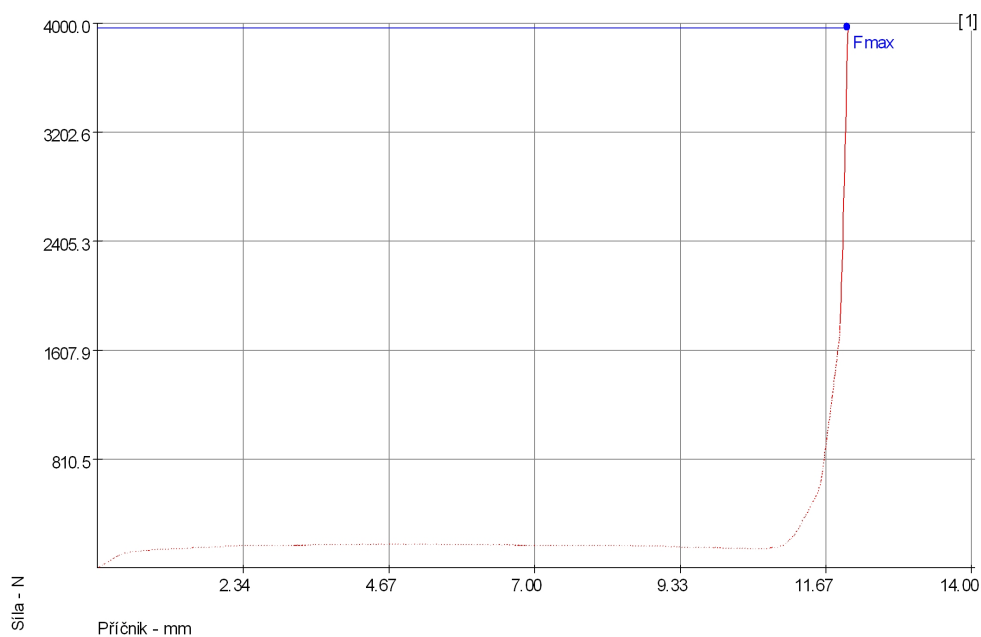
Zkouška ohybem

Vstupní hodnoty

Název materiálu: : H220 BD Z100 Datum testu : 12.4.2007
Smer odebrání vzorku: : 0° Vypracoval : Trdla Jiri
Rozmer vzorku: : 20 x 0,8 mm :
Polomer ohybu : 2,5 mm :

Výstupní hodnoty

Zkouška	Fmax N
1	3966.11
2	3995.78
3	4018.86
4	3976.00
x	3989.19
s	23.31



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1

Tel.: +420 485 353374, +420 605 957404

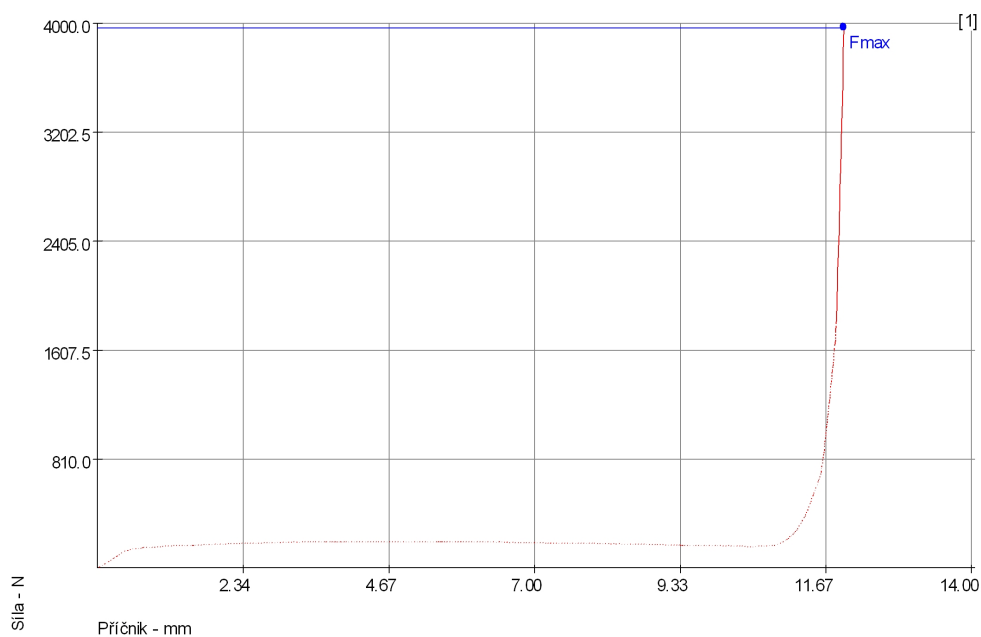
Zkouška ohybem

Vstupní hodnoty

Název materiálu: : H300 BD Z100 Datum testu : 12.4.2007
Smer odebrání vzorku: : 0° Vypracoval : Trdla Jiri
Rozmer vzorku: : 20 x 0,8 mm :
Polomer ohybu : 2,5 mm :

Výstupní hodnoty

Zkouška	Fmax N
1	3966.11
2	4035.34
3	3989.19
4	4025.45
x	4004.02
s	32.13



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů
Hálkova 6, 461 17 Liberec 1

Tel.: +420 485 353374, +420 605 957404

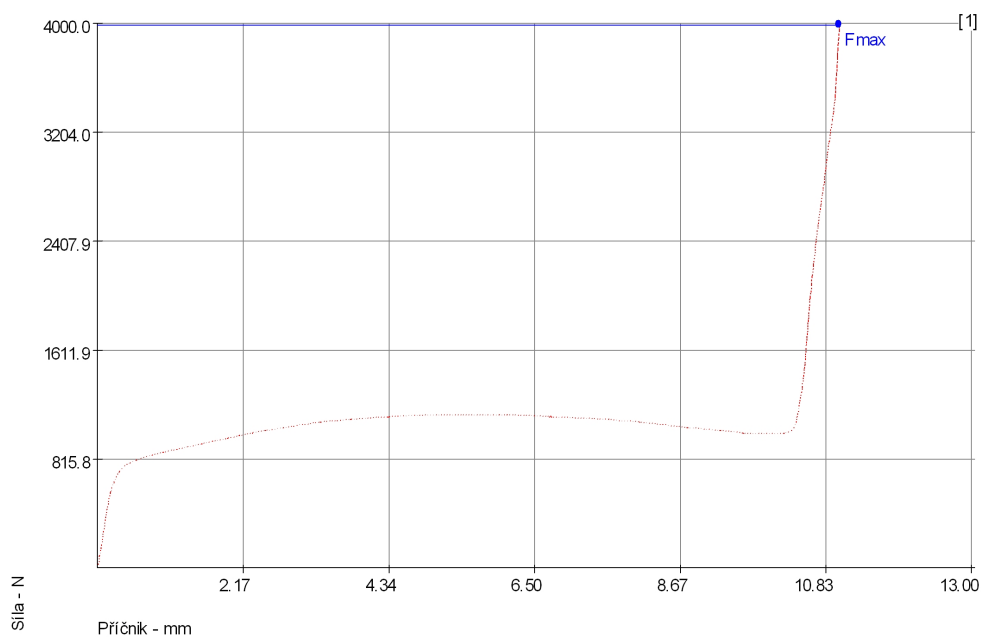
Zkouška ohybem

Vstupní hodnoty

Název materiálu: : H180 BD Z100 Datum testu : 12.4.2007
Smer odebrání vzorku: : 0° Vypracoval : Trdla Jiri
Rozmer vzorku: : 20 x 2 mm :
Polomer ohybu : 2,5 mm :

Výstupní hodnoty

Zkouška	Fmax N
1	3985.89
2	3982.59
3	3992.48
4	4018.86
x	3994.96
s	16.46



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů
Hálkova 6, 461 17 Liberec 1

Tel.: +420 485 353374, +420 605 957404

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25.5.2007

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 25.5.2007

Signature